



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## SLEDOVÁNÍ POHYBU MATERIÁLU V PRŮBĚHU VÝROBY

MATERIAL POSITION TRACKING IN PRODUCTION HALL

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Sládeček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Edita Hejátková

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Michal Sládeček

**ID:** 164400

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Sledování pohybu materiálu v průběhu výroby

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte srovnání v současnosti používaných metod vnitřní lokalizace z hlediska technologie a náročnosti implementace (náklady na systém, pokrytí uvnitř budov, přesnost lokalizace)
2. Zprovozněte platformu Find s běžným klientem (smartphone) ve výrobních prostorách společnosti ALPS Electric Czech. Otestujte dosah i přesnost lokalizace, ověřte stálost zaměření v průběhu času.
3. Navrhněte a implementujte HW klienta (aktivní tag) pro platformu Find založeném na SoC ESP8266 (integrováný obvod s Wi-Fi rádiem a MCU).
4. Navrhněte a implementujte serverovou komponentu reportující polohy tagů do databáze sbírající data o výrobním prostředí.
5. Otestujte dosah i přesnost lokalizace pomocí HW klienta za stejných podmínek jako v bodu (2.)
6. Navrhněte možnou metodiku aktualizace rádiových map.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 22.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Edita Hejátková

**Konzultant:** Ing. Josef Nevrlý, ALPS Electric Czech, s.r.o.

**doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá vývojem lokalizačního zařízení pro sledování polohy, či pohybu materiálu a produktů po výrobní hale. Systém je navržen tak, aby mohl být co nejlevněji a nejjednodušeji implementován do již vytvořené infrastruktury podniku. Pro určení polohy využívá metodu shromažďování sil signálu Wi-Fi a měření anomálií magnetického pole Země uvnitř budov. Tato data se snímají na vytvořeném aktivním lokalizačním zařízení, které komunikuje se serverovou částí systému. Na serveru se data zpracovávají klasifikačními algoritmy, které je následně přiřazují k reálným pozicím. Výsledný systém je připraven pro ukládání vyhodnocených dat, která mohou být následně zpracována s cílem zvýšit efektivitu výrobního procesu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Accelerometr, Fingerprinting, Lokalizace uvnitř budov, Magnetické pole, Magnetometr, WiFi

## **ABSTRACT**

This diploma thesis describes implementation of an indoor positioning system for tracking the location and movement of material and products through the manufacturing plant. The system is designed with regards to simple installation and low overall implementation costs. It utilizes method of Wi-Fi and magnetic field fingerprinting. The system employs a client hardware (active tag with Wi-Fi module and sensors designed for this project) communicating with a server software which does the mapping and fingerprinting processing. Finally positioning system is prepared to collect locations data for further analysis aiming to improve efficiency of manufacturing processes.

## **KEYWORDS**

Accelerometer, Fingerprinting, Indoor Localization, Magnetic field, Magnetometer, WiFi

SLÁDEČEK, Michal. *Sledování pohybu materiálu v průběhu výroby*. Brno, 2018, 106 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Edita Hejátková



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Sledování pohybu materiálu v průběhu výroby“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému konzultantovi panu Ing. Josefovi Nevrlému za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce a firmě ALPS Electric Czech, s.r.o. za technickou podporu a prostory laboratoří. Poděkování patří také vedoucí práce paní Ing. Editě Hejátkové za odborné vedení a rady.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

# OBSAH

Úvod	16
<b>1 Technologie lokalizací ve vnitřních prostorech</b>	<b>17</b>
1.1 Řešení nevyužívající komunikaci	17
1.1.1 Měření magnetických veličin	17
1.1.2 Inerciální lokalizace	18
1.1.3 Zpracování obrazu	19
1.2 Řešení využívající bezdrátovou komunikaci	19
1.2.1 Bluetooth	20
1.2.2 WLAN (Wi-Fi)	20
1.2.3 Rádiová identifikace	21
1.2.4 Ultra-Wideband	21
1.2.5 Mobilní sítě	22
1.2.6 Komunikace ve viditelném spektru	22
1.2.7 Komunikace v infračerveném spektru	22
1.3 Komerční řešení	23
1.4 Vyhodnocení technologií	23
<b>2 Metody určení lokace</b>	<b>25</b>
2.1 Triangulace	25
2.1.1 Úhel příchozího signálu (AOA)	25
2.2 Trilaterace	25
2.2.1 Měření úrovně přijímaného signálu	26
2.2.2 Čas putování signálu (ToF)	27
2.3 Multilaterace (MLAT)	27
2.3.1 Časový rozdíl příchozích signálů (TDoA)	27
2.4 Metoda shromažďování úrovní signálu (Fingerprinting)	27
2.4.1 K-nejbližší sousedi (K-NN)	28
2.4.2 Jrip	28
2.4.3 Náhodný les	29
2.4.4 Bayesova síť	29
<b>3 Lokalizace v sítích Wi-Fi</b>	<b>30</b>
3.1 Technologie Wi-Fi	30
3.1.1 Wi-Fi rámec	30
3.2 Testování hotových řešení	31
3.2.1 Anyplace	31

3.2.2	Find . . . . .	33
3.2.3	Vyhodnocení . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Hardwarový návrh lokalizátoru</b>	<b>36</b>
4.1	Wi-Fi konektivita ESP8266 . . . . .	36
4.1.1	Modul ESP-WROOM-02 . . . . .	37
4.2	Napájení . . . . .	37
4.2.1	Baterie . . . . .	38
4.2.2	Nabíjení . . . . .	38
4.2.3	Napájecí obvody . . . . .	38
4.3	Akcelerometr a magnetometr . . . . .	38
4.4	Programátor a debugger . . . . .	39
4.5	Schematický návrh . . . . .	39
4.6	Návrh plošného spoje . . . . .	43
4.7	Návrh zapouzdření . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Základní oživení zařízení</b>	<b>45</b>
5.1	Výběr programovacího jazyka . . . . .	45
5.1.1	MicroPython . . . . .	45
5.2	Měření stavu baterie . . . . .	47
5.3	Inerciální jednotka . . . . .	47
5.3.1	Magnetometr . . . . .	48
5.3.2	Akcelerometr . . . . .	48
5.3.3	Generace přerušení . . . . .	49
5.4	Porovnání napájecích obvodů . . . . .	49
5.4.1	Vliv aktivního a sleep módu na odběr proudu . . . . .	50
5.4.2	Vliv napěťového regulátoru na magnetometr . . . . .	51
5.4.3	Výdrž plně pracujícího zařízení . . . . .	52
5.4.4	Vyhodnocení . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Magnetická měření</b>	<b>54</b>
6.1	Nastavení magnetického senzoru . . . . .	54
6.2	Meření přesnosti magnetometru . . . . .	55
6.2.1	Vliv UART komunikace . . . . .	55
6.2.2	Vliv natočení magnetometru vůči magnetickému severu . . . . .	56
6.3	Kalibrace . . . . .	57
6.3.1	Metoda maxim a minim . . . . .	59
6.3.2	Metoda interpolace elipsy . . . . .	60
6.3.3	Výběr kalibrační metody . . . . .	60
6.4	Pochopení magnetických dat . . . . .	61

6.5	Testovací měření magnetického pole . . . . .	63
<b>7</b>	<b>Architektura a návrh systému</b>	<b>65</b>
7.1	Firmware lokalizační jednotky . . . . .	65
7.1.1	Minifikace . . . . .	67
7.2	Serverová část . . . . .	67
7.2.1	AioHttp webový server . . . . .	67
7.2.2	SQLite databáze . . . . .	67
7.2.3	Proces mapování . . . . .	68
7.2.4	Find 3 framework . . . . .	68
7.2.5	Jupyter Notebook . . . . .	69
<b>8</b>	<b>Testování lokalizačního systému</b>	<b>70</b>
8.1	Mapování (offline část) . . . . .	70
8.1.1	Vliv velkého prostoru na Wi-Fi . . . . .	71
8.1.2	Vliv velkého prostoru na magnetická měření . . . . .	71
8.2	Výsledky lokalizace . . . . .	73
8.2.1	Výsledná chyba učících algoritmů Find 3 frameworku . . . . .	73
<b>9</b>	<b>Metodiky aktualizace rádiových a magnetických map</b>	<b>78</b>
<b>10</b>	<b>Závěr</b>	<b>79</b>
	<b>Literatura</b>	<b>81</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>88</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>90</b>
<b>A</b>	<b>Zpracování dat systému Find</b>	<b>91</b>
A.1	Šachovnicová měřicí plocha . . . . .	91
A.2	Velikost úrovně signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů . . . . .	92
A.3	Velikost rozptylu signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů . . . . .	93
A.4	Velikost směrodatné odchylky signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů . . . . .	94
A.5	Procentní úspěšnost určení jednotlivých bodů v síti . . . . .	95
<b>B</b>	<b>Návrh lokalizačního zařízení</b>	<b>96</b>
B.1	Schematický návrh . . . . .	96
B.2	Oživení lokalizačního zařízení . . . . .	97

<b>C</b>	<b>Testování lokalizačního systému</b>	<b>98</b>
C.1	Testovací proces mapování prostoru . . . . .	98
C.2	Mapovací zařízení . . . . .	99
C.3	Otisk síly signálu konkrétního Wi-Fi vysílače pro zmapovaný prostor	99
C.4	Proměnlivost složek magnetického pole v testovacím prostoru . . . .	101
C.5	Testovací lokalizace . . . . .	103
<b>D</b>	<b>Nákupní seznam</b>	<b>104</b>
<b>E</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>105</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Znázornění magnetického pole uvnitř budovy [30]	18
1.2	Základní algoritmus inerciální navigace [77]	18
1.3	Ukázka tří různých identifikačních značek [69]	19
1.4	Graf přesnosti lokalizace jednotlivých technologických přístupů [67]	24
2.1	Geometrický model trilaterace [73]	26
2.2	Fingerprint signal strength [65]	28
3.1	Reprezentace Wi-Fi kanálů pásem 2,4000-2,4835 GHz [22]	30
3.2	802.11 frame [60]	31
3.3	Aplikace Anyplace 1 - stav zaznamenaných Wi-Fi signálů, 2 - zaznamenávání Wi-Fi signálů, 3 - lokalizační část	32
4.1	Blokové schéma ESP8266 [15]	36
4.2	Modul ESP-WROOM-02 [14]	37
4.3	Schéma zapojení Wi-Fi modulu	40
4.4	Schéma zapojení nabíjecího obvodu	40
4.5	Schéma zapojení měření stavu baterie	41
4.6	Schéma zapojení 3,3 V napájecího zdroje	41
4.7	Schéma zapojení inerciálních senzorů	42
4.8	Schéma zapojení programátoru	43
4.9	Návrh plošného spoje. Strana součástek na levém obrázku.	44
4.10	Návrh zapouzdření pro 3D tiskárnu.	44
5.1	Blokové schéma práce s magnetometrem	48
5.2	Blokové schéma práce s akcelerometrem	48
5.3	Blokové schéma práce s přerušeními pro poklepání a pohyb	50
5.4	Wi-Fi peak v zapojení s LDO	51
5.5	Wi-Fi peak v zapojení s DC-DC	52
5.6	Vliv LDO na magnetometr	52
5.7	Vliv DC-DC na magnetometr	52
5.8	Test výdrže baterie pro DC-DC a LDO	53
6.1	Vliv vzorkovací frekvence na magnetometr	55
6.2	Vliv UART rozhraní na magnetická měření	56
6.3	Rotace magnetometru kolem osy z	57
6.4	Vlivy na magnetické měření [31]	58
6.5	Nekalibrovaná magnetická data ve 2D	58
6.6	Nekalibrovaná magnetická data ve 3D	58
6.7	Kalibrace metodou maxim a minim - 2D vizualizace	59
6.8	Kalibrace metodou maxim a minim - 3D vizualizace	59
6.9	Algoritmus kalibrace metodou maxim a minim	60



6.10	Algoritmus kalibrace metodou interpolace elipsy . . . . .	60
6.11	Kalibrace metodou nejmenších čtverců - 2D vizualizace . . . . .	61
6.12	Kalibrace metodou nejmenších čtverců - 3D vizualizace . . . . .	61
6.13	Využití gravitace pro určení vertikální a horizontální složky magnetického pole [66] . . . . .	62
6.14	Znázornění velikosti vektoru intezity magnetického pole v testovaném prostoru . . . . .	64
7.1	Architektura lokalizačního systému . . . . .	65
7.2	Blokové schéma architektury firmwaru . . . . .	66
7.3	Struktura SQL databáze . . . . .	68
8.1	Ukázka programu pro monitoring mapování . . . . .	70
8.2	Porovnání reálných vertikálních složek magnetického pole měřených zařízení v průběhu měření přes celou testovací plochu . . . . .	72
8.3	Porovnání vertikálních složek pro upravené kalibrační konstanty . . . . .	73
8.4	Náhodně nasnímané testovací body v testovacím prostoru pro následné určení chyby výstupu z Find 3 . . . . .	74
8.5	Průměrná chyba určení pozice jednotlivých klasifikátorů . . . . .	75
8.6	Chyba lokalizace testovacích bodů z obrázku 8.4 po započtení váženého průměru všech metod . . . . .	75
8.7	Chyba určení pozice po zpřesnění dopočítáváním vzdálenosti vysílače . . . . .	77
A.1	Měřicí plocha ve firmě Alps Electric pro testy v kapitole 3.2 a sekci 6.5 . . . . .	91
A.2	Velikost úrovně signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů pro testovací plochu A.1, kde jednotlivé čtverce odpovídají čtvercům sítě jednotlivých teplotních map - Find . . . . .	92
A.3	Velikost rozptylu signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů pro testovací plochu A.1, kde jednotlivé čtverce odpovídají čtvercům sítě jednotlivých teplotních map - Find . . . . .	93
A.4	Velikost směrodatné odchylky signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů pro testovací plochu A.1, kde jednotlivé čtverce odpovídají čtvercům sítě jednotlivých teplotních map - Find . . . . .	94
A.5	Procentní úspěšnost jednotlivých hledaných bodů pro testovací plochu A.1, kde jednotlivé čtverce odpovídají čtvercům sítě jednotlivých teplotních map - Find . . . . .	95
C.1	Mapování prostoru . . . . .	98
C.2	Mapovací zařízení . . . . .	99
C.3	Síla signálu Wi-Fi e4:8d:8c:f2:39:12 v testovacím prostoru 11,6 x 23,5 m pro lokalizátory 1, 2 a 3 . . . . .	100
C.4	Proměnlivost magnetických složek pro vybraný lokalizátor . . . . .	102
C.5	Výsledná lokalizace s triangulovaným zpřesněním . . . . .	103

# SEZNAM TABULEK

3.1	Naměřené hodnoty systému Find šachovnice $4 \times 4$ . . . . .	35
3.2	Naměřené hodnoty systému Find při zvětšení rozestupů . . . . .	35
5.1	Proudový odběr v závislosti na módech a regulátorech napětí . . . . .	50
D.1	Nákupní seznam lokalizačního zařízení (ceny při objednání 50 kusů) .	104

# SEZNAM VÝPISŮ

5.1	Příklad nahrání firmwaru do modulu ESP-WROOM-02. . . . .	46
5.2	Komunikace a základní příkazy pro správu mikrokontroléru. . . . .	46
5.3	Základní příkazy pro správu souborového systému v MicroPythonu . . . . .	47
7.1	Ukázka možného formátu main.py . . . . .	66
B.1	Ukázka MicroPython programu pro zjištění stavu baterie . . . . .	97

# ÚVOD

Z důvodu zefektivňování kvality a jakosti výroby, se nabízí jako dobrý nástroj monitoring lokace (respektive IPS - Indoor Positioning System) materiálu a vyrobených kusů ve výrobní hale. Díky lokalizačním datům lze analýzou odhalit možné chyby operátorů, špatné nastavení výrobního procesu, či zbytečných prostojů a tím zefektivnit časovou flexibilitu výroby jako celku. Tato diplomová práce se zabývá vývojem systému, který je schopen získat a následně zpracovat diskutované poziční data na straně počítačového serveru.

Ve většině případů se výrobky po výrobní hale přesunují pomocí vozíků či krabic, na které se může upevnit jakákoliv bezdrátová elektronika. Podmínkou však je, aby zařízení vydrželo v provozu alespoň jednu celou pracovní směnu (12 hodin) a zároveň svými rozměry neomezovalo operátory ani celkovou efektivitu výrobního procesu. Technologicky lze výsledné zařízení navrhnout tak, aby zjistilo svoji aktuální pozici několika způsoby. Klíčovým selektorem lokalizační technologie návrhu je však možnost implementace do již zaběhnutého závodu a to bez nutnosti větších dodatečných investic do infrastruktury (např. instalace vysílačů). Výstupem této diplomové práce je volba konkrétní technologie, zhodnocení dostupných mobilních řešení a následný vývoj a konstrukce vlastního zařízení spolu s návrhem a otestováním procesu lokalizace. Na konci práce jsou diskutovány metody aktualizací zmapovaného prostoru.

# 1 TECHNOLOGIE LOKALIZACÍ VE VNITŘNÍCH PROSTORÁCH

Současné globální navigační systémy (GNSS) založené na lokalizaci pomocí radiových signálů z družic mají z důvodů spojených s šířením jejich signálu omezenou schopnost fungovat uvnitř většiny budov.

Pro potřeby lokalizace objektů ve vnitřních prostorách je proto v praxi většinou nutné zprovoznit dodatečný systém. V následujících podkapitolách jsou rozebrány základní technologie zabývající se vnitřní lokalizací. Na konci vzejde vybraná technologie, která bude splňovat veškerá kritéria a bude dále použita pro vývoj lokalizačního systému. [45][79]

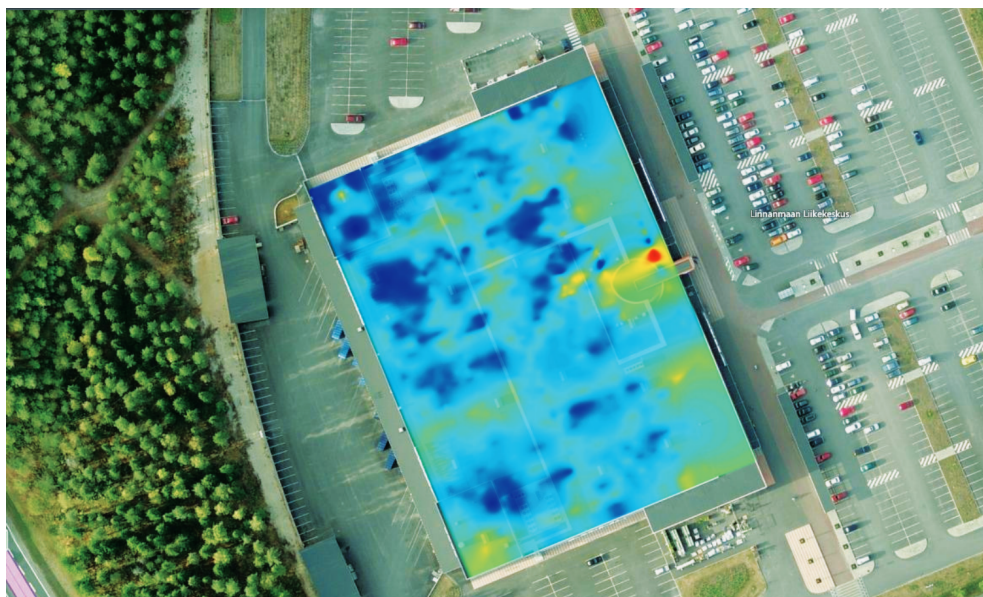
## 1.1 Řešení nevyužívající komunikaci

Řešení nevyužívající rádiový přenos jsou založena na měření fyzikálních veličin z okolí. To znamená, že se využívá přírodních jevů, popřípadě pasivních tagů pro kamerová srovnání.

### 1.1.1 Měření magnetických veličin

Mechanismy lokalizace využívají měření anomálií zemského magnetického pole, které je možno měřit magnetometrem. Tento senzor je dnes s dostatečnou přesností dostupný i jako integrovaná součástka použitelná v lokalizačních jednotkách. [69]

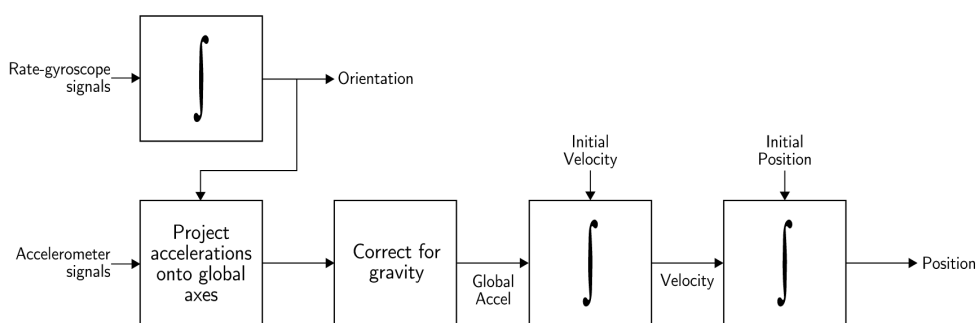
V případě navigace ve vnitřních prostorách se využívá měření anomálií způsobených stavebními materiály a konstrukčními prvky budovy. Data naměřená v takovémto prostoru se dají porovnat s mapou budovy a to lze využít k lokalizaci (viz obrázek 1.1). Pro zjištění této charakteristické stopy stačí použít zařízení s již zmiňovaným magnetometrem (například mobilní telefon), který se nejdříve použije k nashromáždění dat, která se následně přiřadí k plánu budovy 2.4, což se poté využije k vyhodnocení vlastní lokalizace. Přesnost systému je v nejlepších případech 1,8 m. Lokalizace za pomoci měření magnetického pole má však i své nevýhody. Systém vyžaduje opakovaná měření v případě strukturálních změn interiéru či samotné stavby. Konstrukce většiny budov je tvořena opakujícími se konstrukčními částmi, takže se anomálie opakují, což snižuje přesnost pro velké budovy. [30]



Obr. 1.1: Znázornění magnetického pole uvnitř budovy [30]

### 1.1.2 Inerciální lokalizace

Tato metoda je založena na započítávání inkrementálních změn vůči známé výchozí poloze. Data pro tyto inkrementální změny jsou nejčastěji získávány z akcelerometru (senzor měřící akceleraci), gyroskopu (měření natočení v prostoru) a někdy také magnetometru (měření orientaci vůči zemskému magnetickému poli). Všechny tyto komponenty jsou jako celek pojmenovány zkratkou IMU (Inertial Measurement Unit). Zařízení obsahující IMU senzory pak z naměřených dat dokáží spočítat výšku, rychlost a pozici.



Obr. 1.2: Základní algoritmus inerciální navigace [77]

Z přepočtového algoritmu (obrázek 1.2) je patrné, že pro každý výpočet je nutné znát výchozí rychlost a pozici. Tím pádem chyba výpočtu roste s počtem vypo-

čítaných lokalizačních bodů od prvního známého (každý nový výsledek je poznamenán vyšší chybou). To znamená, že inerciální metoda je vhodná pouze na kratší vzdálenosti. Přesnost se dá vylepšit již zmiňovaným magnetometrem, duplicitou IMU, ale také různými filtračními algoritmy. Měření s IMU se dá použít i nepřímo s tím, že detekuje pohyby kráčejícího člověka nebo zvířete. Trajektorie je následně dopočítána detekcí počtu kroků. Inerciální navigace se používá především jako podpůrný systém v široké škále aplikací, jako je kosmonautika, letectví, lodní dopravy, ale také monitorování pohybu osob. [77][69]

### 1.1.3 Zpracování obrazu

Existuje několik základních metod, díky kterým se v prostoru dokážeme orientovat za pomoci této technologie. První z možností je porovnávání s referenčním snímkem. Pokud je objekt/místoplast nasnímána a přidána pod určitou lokací do databáze, je pak možné porovnávat snímky s těmi v databázi, díky kterým lze dohledat konkrétní místo. Další možností je využít předem definované unikátní vizuální značky, které budou mít přiřazenou lokaci v budově. V praxi se používají například QR (Quick Response) kódy (obrázek 1.3), které jsou umístěny v interiéru. Tyto body jsou rozpoznány v pořízených snímcích a následně vyhodnoceny. Jednou z nejtěžších metod a také další možností, jak určit polohu je převod pořízeného snímku do 3D objektu. Tento objekt se dokáže porovnat s počítačovým modelem a s relativně velkou přesností dokáže určit jeho polohu. Kamery snímání je poměrně jednoduché na



Obr. 1.3: Ukázka tří různých identifikačních značek [69]

hardwarovou implementací, má však daleko náročnější softwarovou část a další nevýhody. Pro správnou detekci celého objektu musí být zajištěno správné osvětlení, dostatečné rozlišení kamery a také nutný výpočetní výkon, který dokáže snímek rychle zpracovávat. [69]

## 1.2 Řešení využívající bezdrátovou komunikaci

Pro lokalizaci tohoto typu jsou potřeba dvě zařízení. Vysílač, u kterého je známá přesná poloha a přijímač, který pouze zachytává signál z vysílače a podle různých

matematických modelů 2 dokáže dopočítat svoji aktuální pozici. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost vytvářet infrastrukturu vysílačů. V závislosti na konkrétním použitém řešení se může dosahovat větší přesnosti, než u předchozích zmiňovaných řešení. Technologicky se tento proces dá implementovat různými rádiovými metodami, ale například i za pomoci modulace světelných zdrojů.

### 1.2.1 Bluetooth

Bluetooth a k ní přidružená Bluetooth Low Energy (BLE) technologie využívá rádiového pásma 2,4 - 2,48 GHz a není nijak koncipována pro možnosti lokalizační technologie. Celý koncept je určen především pro energeticky nenáročnou komunikaci mezi zařízeními spotřební elektroniky.

Přestože k tomu nebyla technologie BLE vytvořena, dá se také využít jako lokalizační technologie v budovách. Dosah v takovéto konfiguraci je omezený na maximálně několik desítek metrů a pro správnou funkci je nutné rozmístit po budově mnoho vysílačů. Pro zjištění pozice jsou stěžejní zejména dva základní přístupy. První je dopočítávání pozice ze třech známých vysílacích bodů 2.2, které jsou vhodně umístěny v prostoru. Jako méně přesnější metoda se dá použít pouze několik málo vysílačů které budou pouze oznamovat, že je dané zařízení v určité místnosti. Mezi poslední metody pak patří kompletní zmapování prostoru po diskrétních úsecích 2.4.

Jednou z výhod BLE lokalizace je bezesporu energetická nenáročnost (výdrž vysílače až 24 měsíců na baterii) a relativní jednoduchost implementace. Praktická omezení však technologii mírně limitují. BLE je totiž celkem náchylný na útlum signálu skrze objekty postavené mu do cesty a také na jeho vícecestné šíření, díky čemuž se síla signálu potřebná ke správnému výpočtu stává proměnlivou. [59][72]

### 1.2.2 WLAN (Wi-Fi)

Tato technologie se využívá jako nejběžnější bezdrátová infrastruktura počítačových sítí a je podporována velkým množstvím spotřebních zařízení. Tomuto rozšíření odpovídá snadno dostupná součástková základna.

Rozsáhlého pokrytí Wi-Fi signálem se využívá také k lokalizaci uvnitř budov. Existuje několik základních metod, jak s WPS (Wi-Fi Positioning System) pracovat. Patří zde metoda trilaterace 2.2, metoda rádiového otisku (Fingerprinting) 2.4, nebo dopočítávání polohy pomocí triangulace 2.1. Jednotlivé přístupy jsou probrány v kapitole 2. [54][59]



### 1.2.3 Rádiová identifikace

Technologie RFID (Radio Frequency Identification) využívá jednoduché identifikátory, které fungují na principu odpovědi na vysílání svým unikátním ID. Byly vytvořeny jako náhrada čárových kódů a fungují na frekvenci  $125\text{ kHz}$ ,  $134\text{ kHz}$  a  $13,56\text{ MHz}$  (popř. také  $868\text{ MHz}$  v Evropě a  $915\text{ MHz}$  v Americe). Celý systém se skládá ze stanic které vysílají elektromagnetický signál k sledovaným jednotkám (tagům). Rozeznáváme dva základní druhy RFID tagů. Pasivní tagy se skládají z cívky, kapacitoru a RFID čipu. Jakmile se tento tag dostane do elektromagnetického pole, získá energii k odeslání identifikačního čísla. Pasivní metoda se však dá aplikovat, když je tag nejdále dva metry od vysílače, což se pro lokalizaci uvnitř budovy hodí například pro zjištění, zda někdo prošel dveřmi. Aktivní metoda se liší cenou i velikostí tagu. Důvodem je mimo jiné nutnost implementace baterie s napájecím obvodem. Přesto se aktivní RFID tag pro přesnější lokalizaci hodí více. Aktivní tag má totiž dosah až deset metrů, což s důkladným pokrytím vysílacích stanic dokáže zvýšit použitelnost takového systému. [67]

### 1.2.4 Ultra-Wideband

Ultra-Wideband (UWB) je rádiová technologie přenosu dat s šířkou pásma přesahující  $500\text{ MHz}$ . Alokované pásmo dle specifikace je od  $3,1$  do  $10,6\text{ GHz}$  s nízkými vysílacími výkony. Technologie Ultra-Wideband se používá ve dvou základních módech, prvním je provoz s klasickým modulačním schématem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), druhým je pulzní modulace v časové oblasti. Právě tento druhý mód díky svým krátkým pulsům (typicky  $< 1\text{ ns}$ ) umožňuje na přijímači detekovat přímý signál a jeho odrazy způsobené kopie. Tím se eliminuje vliv vícecestného šíření signálu, který je zásadním zdrojem chyb při trilateraci pomocí měření úrovně signálu u technologií Wi-Fi a BLE.

Lokalizace UWB probíhá na principu rozdílu času příchozího a odeslaného signálu, případně časového rozdílu příjmu signálu z více zdrojů. Počítač poté z těchto časových hodnot a hodnot pozic stanic v prostoru dopočítává polohu mobilního zařízení v prostoru. Přesnost Ultra-Wideband lokalizace je v řádech jednotek centimetrů. Vzhledem k tomu, že je UWB navrženo na malé vysílací výkony, je jeho dosah limitován na desítky metrů. Pro zvýšení dosahu je nutné přidávat další vysílače. Ve většině UWB lokalizačních zařízení se používají obvody společnosti *DecaWave DW1000*, jejichž cena se pohybuje okolo  $10\text{ USD}$  za kus. [67][69][24]

### 1.2.5 Mobilní sítě

Některé metodiky pro získání polohy jsou postaveny na technologii GSM (Global System for Mobile Communications). GSM sítě se používají zejména pro komunikační a datové účely především pro mobilní stanice. Tyto sítě jsou charakteristické svou architekturou buněk, díky kterým je zajištěna konektivita (makro, mikro a deštníkové buňky). Lokalizace v rámci buňkových sítí *GSM 3GPP* je běžně využívaná. Dá se použít také pro lokalizaci uvnitř budov. Lokalizace pak funguje na principu několikrát zmiňovaném systému sběru dat o síle signálů. Výsledná chyba je závislá na poloze a hustotě buněk 2.4. [76]

### 1.2.6 Komunikace ve viditelném spektru

Světlo emitující dioda (LED) se čím dál více častěji využívá jako zdroj vnitřního osvětlení, vzhledem ke svojí životnosti a efektivnosti. Při porovnání s ostatními metodami osvětlení má technologie LED několik dalších výhod, jako jsou účinnost, či s ohledem na možnosti vnitřní lokalizace především vysokofrekvenční modulovatelnost. Právě tato vlastnost se používá k přenosu informací (VLC - Visible Light Communication). Komunikace na bázi VLC se pak může využít pro lokalizaci.

Existují dvě základní metody pro VLC lokalizaci. První metoda je postavená na optickém sledování a zobrazování. Výsledkem je velice přesné měření (až jednotky milimetrů). Tato přesnost se ale razantně podepisuje na ceně implementace, která je několikanásobně vyšší (drahý šestiosý senzor) než metoda druhá, která totiž zpracovává informace ze tří viditelných LED a pomocí trilaterace 2.2 dopočítává výslednou polohu. Snímačem pro relativně méně přesné měření může posloužit přední kamera u chytrých mobilních telefonů. V praxi se používají i metody kdy jsou v uličkách supermarketů LED osvětlení. Každý segment pulsuje na své frekvenci, optický snímač podle toho může definovat daný segment a s tím i pozici v prostoru. Přesnost takového systému je závislá na rozmístění světelných prvků. [78]

### 1.2.7 Komunikace v infračerveném spektru

Lokalizace objektu se dá zajistit také přes technologii IR (Infrared). Sledovaný objekt vysílá infračervené paprsky, které jsou snímány stacionární stereo kamerou. Tato metoda umožňuje sledování vysokého počtu zařízení v jeden okamžik bez většího vlivu na přesnost a rychlost. Jednou z nevýhod je však nutnost přímého výhledu sledovaného objektu ke stacionárnímu snímači (většinou umístěného uprostřed místnosti). Vlastní lokalizaci lze provádět několika způsoby. Jeden z nejčastěji používaných způsobů je měření úhlu dopadu IR záření na stacionární stereo kameru. Poloha sledovaného zařízení je následně dopočítána trilaterací 2.2. Přesnost této metodiky se

pohybuje v desítkách centimetrů, to však navzdory vyšší ceny stacionární stereo kamery. [55]

## 1.3 Komerční řešení

Technologie zmíněné v předchozích sekcích jsou již využívány v komerčních řešeních. Pro přehled jsou uvedeny vybrané systémy.

*SEWIO* využívá k přesné lokalizaci senzory fungující na širokopásmové bezdrátové technologii. Výstupem je pak nejen lokalizace v reálném čase, ale také monitoring a management nasnímaných dat, distribuované přes webové rozhraní. Cena pokrytí  $400\text{ m}^2$  se pohybuje okolo 3000 €. [43]

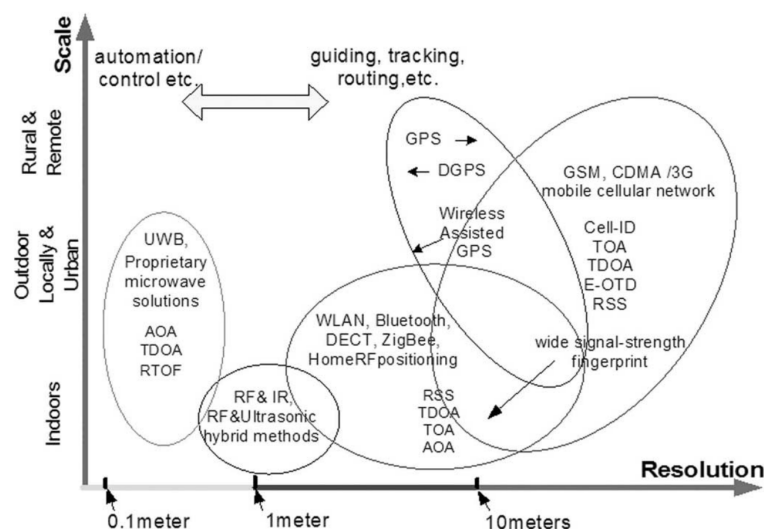
*Kontakt.io* lokalizaci uvnitř budov staví na technologii Bluetooth Low Energy, kde sesbíraná data o pozici jednotlivých Bluetooth přijímačů přehledně analyzuje přes dodávané webové rozhraní. Cena tří tagů a jednoho přijímače, který má dosah v okruhu 50 m kolem sebe se pohybuje okolo 200 €. [7]

*Infsoft.com* se zabývá technologiemi Bluetooth, Wi-Fi, širokopásmovou detekcí a zpracování obrazu pro určování pozice uvnitř budov. Výsledek lokalizace si zákazník může nastavit i prohlédnout přes webové rozhraní. Technologie firmy se používají v lékařství, ve výrobních závodech ale také při sportovních událostech, či dopravě hromadnou dopravou. [23]

## 1.4 Vyhodnocení technologií

V předchozích podkapitolách byly zmíněny některé metody, jakými lze technicky přistupovat k systémům lokalizace uvnitř budov. Každá z těchto technik má své klady i zápory. Pro správný výběr technologie je nutné vzít tyto fakta v úvahu a porovnávat je s definovanými potřebami pro konkrétní použití. Z hlediska vypracovávaného zadání je možné hned z počátku eliminovat veškerá probraná řešení nevyužívající komunikaci 1.1. Samotné měření magnetických veličin 1.1.1 je nepřijatelné z důvodu velkého rušení a opakovatelnosti magnetických anomálií. Inerciální lokalizace 1.1.2, pak vnáší relativně velkou chybu v průběhu času snímání a kamerový systém je nutné eliminovat hlavně kvůli softwarové a hardwarové náročnosti lokalizačních jednotek. Pro konečný výběr je vhodné se soustředit především na rádiová řešení 1.2.

Typickým rozhodovacím kritériem je bezesporu přesnost lokalizace. Ta se však u všech přístupů liší a je vesměs vztažná k finální ceně implementace. Základní graf přesností jednotlivých technik je zobrazen na obrázku 1.4, kde je možné vidět relativní rozlišení na ose  $x$  a typické prostředí pro použití na ose  $y$ .



Obr. 1.4: Graf přesnosti lokalizace jednotlivých technologických přístupů [67]

Pro potřeby monitorování vozíků s výrobky není zásadní výsledná přesnost. Rozlišení se v těchto případech mohou držet kritéria desítek až stovek centimetrů. To umožňuje eliminovat relativně drahé technologie jako jsou UWB 1.2.4. Z předem probraných metod které leží v deklarovaném pásmu přesností, je vhodné se zabývat o Bluetooth a Wi-Fi technologie. Nejen, že technologie dle dostupných hodnot přesnosti pro lokalizační účely dostačují, je nutné zmínit také fakt, že rádiové moduly pro tyto technologie vycházejí cenově výhodněji a to hlavně díky masovému rozšíření v elektronických komunikačních systémech. Vezmeme-li však vstupní požadavek, který preferuje použitelnost již vybudované infrastruktury ve výrobní hale, je možné eliminovat i metodu Bluetooth lokalizace. Ve výrobních halách firmy Alps Electric Czech s.r.o je totiž implementována Wi-Fi infrastruktura. Nadále se tedy práce orientuje na vývoj Wi-Fi lokalizace uvnitř budov. [67][4]

## 2 METODY URČENÍ LOKACE

Pro určení pozice lokalizovaného zařízení se používají metody a algoritmy, které provádějí výpočet z dat naměřených na lokalizovaném zařízení a referenčních dat systému. Různé technologie diskutované v 1 využívají různé metody výpočtu. V této kapitole je proto probráno několik základních algoritmických postupů pro stanovení pozice v prostoru pro technologie využívající bezdrátovou komunikaci.

### 2.1 Triangulace

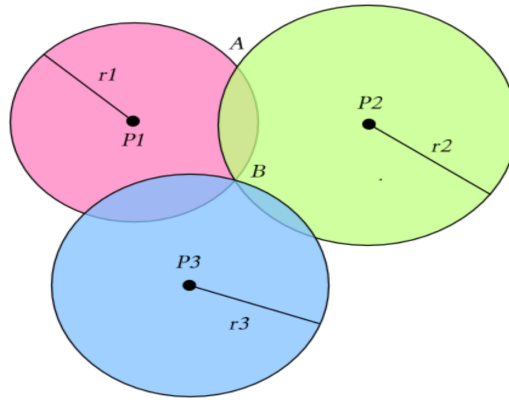
Triangulace dopočítává neznámou polohu a vzdálenost od vysílačů za pomoci trigonometrických výpočtů. Sestrojením trojúhelníku se dvěma známými koncovými body kde třetím bodem je místo, které se dopočítává. Velikost trojúhelníku, respektive pozice hledaného bodu se určí podle věty *USU* (úhel, strana, úhel). Pro zjištění úhlu příchozí vlny je nutná instalace několika směrových antén a vícekanálového přijímače, což výsledný návrh prodražuje. [74]

#### 2.1.1 Úhel příchozího signálu (AOA)

Úhel příchozího signálu AoA (Angle of Arrival) je metoda, která určuje směr šíření rádiové vlny na poli antén rozmístěných rovnoměrně do všech směrů. Směr příchozí vlny se určí měřením časových rozdílů detekce signálu na jednotlivých anténách. Díky zjištěným úhlům lze následně použít větu triangulace ze které je možné dopočítat požadovanou vzdálenost. [1]

### 2.2 Trilaterace

Trilaterace je jedna z nejpoužívanějších metod, která dopočítává polohu zařízení ze tří vysílačů se známou polohou. V praxi si můžeme tuto metodu namodelovat geometricky (obrázku 2.1). Vezmeme-li v úvahu, že poloha našeho lokalizačního zařízení je v bodě  $B$  a zároveň polohu bodů  $P_1$ ,  $P_2$  a  $P_3$  známe v souřadnicových tvarech  $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,  $(X_1, Y_1, Z_1)$  a  $(X_2, Y_2, Z_2)$ , použijeme právě trilateraci k dopočítání požadovaného bodu  $B$ . Na rozdíl od triangulace 2.1 se v této metodě měří tři délky. Algoritmus se tedy řídí větou *SSS* (strana, strana, strana) pro geometrická znázornění pomocí trojúhelníků. Popsat se dá také pomocí kružnic, či kulových ploch. [73].



Obr. 2.1: Geometrický model trilaterace [73]

Pro samotné měření vzdáleností pro trilateraci se dá použít následujících metod:

### 2.2.1 Měření úrovně přijímaného signálu

Vzdálenost mezi vysílačem a přijímčem je možno vypočítat, známe-li hodnotu úrovně signálu na přijímači lokalizační jednotky, výkon vysílače a model šíření signálu v prostoru. U technologií Wi-Fi či Bluetooth je hodnota úrovně signálu na přijímači běžně dostupná jako údaj RSSI (Received Signal Strength Indicator).

RSSI hodnota udává úroveň signálu změřenou na vstupu přijímače. V praxi je většinou tato hodnota reprezentována v jednotkách  $dBm$ <sup>1</sup>. Možné Rozsahy hodnot závisí na parametrech přijímače a udává je výrobce (například *Cisco* 0 - 100  $dBm$ , nebo *Atheros* 0 - 127  $dBm$ ). Hodnotu RSSI neurčuje pouze reálný výkon přijímaného signálu, ale také šum, zisk antény, či útlum vedení k anténě. Přesnost hodnoty RSSI u Wi-Fi zařízení není nijak limitována normou (802.11), proto si jednotliví výrobci definují vlastní limity. [60] [49]

Přesnost této metody určení vzdálenosti je kromě přesnosti samotného měření úrovně signálu na přijímači také zcela zásadně ovlivněna skutečným šířením signálu v prostoru, které není možné zcela popsat modelem šíření rádiových vln ve volném prostoru. Především dva jevy zde mají kritický vliv:

- útlum signálu při šíření přes reálné překážky na spojnici mezi vysílačem a přijímačem (Line of Sight, LoS)

<sup>1</sup> **dBm** je zkratka pro decibel výkonově vztažený k 1  $mW$ . Jednotka je využívána převážně v mikrovlnných, optických a rádiových sítích jako pohodlné měření absolutního výkonu kvůli velkým výkonovým rozdílům. Hodnota 0  $dBm$  odpovídá výkonu 1  $mW$ , což odpovídá vzorci  $x = 10 \times \log(\frac{P}{1mW}) [dBm]$ . [9]

- vícecestné šíření, při kterém se úroveň signálu na vstupu vysílače výrazně mění i při malé změně polohy z důvodu interference přímých a odražených vln.

### 2.2.2 Čas putování signálu (ToF)

ToF (Time of Flight) se spoléhá na přesnou časovou synchronizaci vysílače a přijímače. Vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem se dopočítá vynásobením časového rozdílu  $\Delta t$  (čas příjetí - čas odeslání) s předpokládanou rychlostí šíření signálu v prostoru. Existuje několik metod, jak zajistit, aby druhá strana měla informaci o času odeslání, např. datovým přenosem časové značky, či vysíláním/přijmem v pravidelných intervalech.

Tato metoda může při vhodně zvolené technologii 1.2.4 dosahovat velmi vysoké přesnosti lokalizace. Hlavní riziko, snižující přesnost v tomto typu zaměření, je překážka pro příjem přímého signálu (problém Non Line-of-Sight, NLoS).

## 2.3 Multilaterace (MLAT)

Multilaterace je lokalizační technika měřící rozdíl vzdálenosti dvou stanic, které vysílají ve známých časech a jsou umístěny na definovaných místech. Rozdílem oproti triangulaci, či trilateraci, měření rozdílu vzdálenosti mezi stanicemi vede k získání nekonečného počtu výsledných míst, která po vykreslení tvoří hyperbolickou křivku. Ke zpřesnění umístění na křivce se multilaterace opírá o několik dalších měření (další dvojice stanic), které protínají předchozí křivky a tím zpřesňují okolí výsledku. [40]

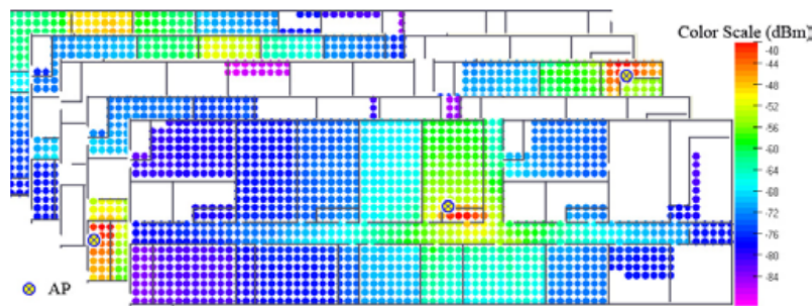
### 2.3.1 Časový rozdíl příchozích signálů (TDoA)

TDoA (Time Difference of Arrival) je jeden z hlavních přístupů multilaterace. Konektní zaměření přijímače je zajištěno alespoň třemi synchronizovanými vysílači se známými polohami. Tyto vysílače v jeden časový okamžik vyšlou své identifikátory. Celý systém je navržen tak, aby zde nefigurovalo přenášení přesných časových hodnot vyslání, přijímač je zde schopen totiž dopočítat polohu pouze z časového rozdílu příchozích signálů jednotlivých vysílačů zaznamenaných jako průměty hyperboloidů. [40]

## 2.4 Metoda shromažďování úrovní signálu (Fingerprinting)

Tento postup se sestává ze dvou částí. V první části je nutno sestavit referenční databázi, která je složena z údajů úrovní signálů 2.2.1 jednotlivých vysílačů v po-

krývaném prostoru. Databáze se vytváří rozdělením prostoru na co nejmenší bloky. V každém takovém bloku je nutné následně změřit úroveň signálů (opakováním měření se zajišťuje lepší přesnost). Ke každému naměřenému bodu se následně přiřazuje reálná poloha  $(x, y)$ . Ve druhé části pak již probíhá samotná lokalizace z hodnot intenzit signálů naměřených lokalizační jednotkou. Ty se porovnávají s hodnotami v referenční databázi získané v první části. Porovnání je typicky úlohou klasifikace, prováděnou vhodným algoritmem strojového učení. Reálně nasnímané prostředí je znázorněno na obrázku 2.2, kde je barevně znázorněna síla signálu v jednotlivých snímaných bodech. Existuje mnoho klasifikačních metod, lišících se např. v přesnosti, náročnosti výpočtu a maximální reálnou velikostí referenční databáze. V následujících podkapitolách jsou zmíněny některé z nich. [65] [73] [62]



Obr. 2.2: Fingerprint signal strength [65]

### 2.4.1 K-nejbližší sousedi (K-NN)

K-NN (K-Nearest Neighbor) je jedna z nejjednodušších metod klasifikování a vyhodnocování nasbíraných dat. Poloha každého vzorku je určena většinovým porovnáním hodnot sousedních vzorků v závislosti na dopočítané euklidovské vzdálenosti. Výsledná hodnota je tím přesnější, čím vhodněji je nastaven počet sousedních vzorků, podle kterých se počítá. V základním algoritmu K-NN může nastávat velká chyba, která je způsobena opakovatelností úrovní signálů v prostoru. [63] Tuto chybu eliminuje algoritmus *Fuzzy K-NN*, který navíc porovnává vazby mezi jednotlivými sousedy. [75] [64]

### 2.4.2 Jrip

Tento učicí proces je založen na generovaném souboru pravidel, který slouží ke klasifikaci naměřených dat. Je to jedna z velmi základních a efektivních technik v algoritmech rozhodovacích stromů. Základním principem je vygenerování souboru pravidel, který se následně redukuje na pravidla jednodušší. [75]



### 2.4.3 Náhodný les

Tento učící algoritmus je založen na generování velkého počtu rozhodovacích stromů. Výsledkem každého stromu je klasifikační výsledek, který je následně porovnáván k ostatním výsledkům. Les následně vybere výsledek s největší hodnotou, protože algoritmus dokáže odhadnout důležitost jednotlivých prvků. Učení každého rozhodovacího stromu je založeno na rekursivním procesu kde jsou vstupní data rozdělena na podskupiny. Tento proces poté běží tak dlouho, dokud nemají všechny uzly stromu stejný výsledek. [75] [57]

### 2.4.4 Bayesova síť

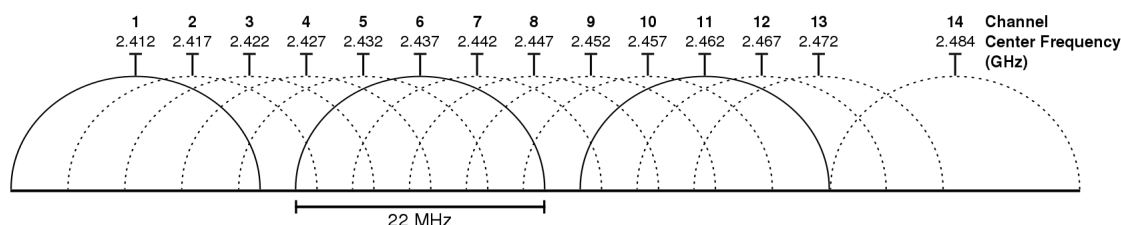
Bayesova síť je postavena na Bayesově větě [6]. Je definována grafickým pravděpodobnostním modelem multivariačních analýz, které jsou nasměrovány acyklickými grafy, mající související pravděpodobnost s distribuční funkcí. Bayesova síť má schopnost určit pravděpodobnost, že jsou určité hypotézy pravdivé. [68] [68]

## 3 LOKALIZACE V SÍTÍCH WI-FI

V kapitole 1 byla jako metoda zajišťující určení polohy vybrána technologie Wi-Fi 1.2.2. Základní výhody a nevýhody byly už zmíněny v předchozích částech textu. V této kapitole je problematiku lokalizace pomocí Wi-Fi signálu rozebrána podrobněji. Jsou v zde probrány základy Wi-Fi komunikace spolu s testy předpřipravených mechanismů Wi-Fi lokalizace ve výrobní hale firmy Alps Electric Czech s.r.o. za použití chytrého telefonu. Výstupem této kapitoly je volba vhodné metody z výčtu v kapitole 2, která pak bude použita v následné implementaci lokalizačního systému.

### 3.1 Technologie Wi-Fi

Wi-Fi je obchodní název pro bezdrátovou síť, která je určena primárně jako náhrada kabelového ethernetu. Nachází se v bezlicenčním pásmu  $2,4\text{ GHz}$  ( $5\text{ GHz}$ ). Na obrázku 3.1 je znázorněno rozdělení pásem  $2,4000 - 2,4835\text{ GHz}$  do 13 kanálů, které jsou navzájem posunuty o  $5\text{ MHz}$ . Celou specifikaci zastřešuje norma *IEEE 802.11x* kde se písmeno *x* nahrazuje verzemi tohoto protokolu (například *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *g*, *h*, *n*), podle které je systém oficiálně pojmenován. Výhodou této technologie jsou především nízké pořizovací náklady na vybudování infrastruktury, které hlavně díky masové produkci Wi-Fi zařízení zlevní. Mezi hlavní nevýhodu pak patří využívání frekvence  $2,4\text{ GHz}$ , která je většinou rušena technologiemi fungujícími na stejné frekvenci 1.2.1. [22] [60]

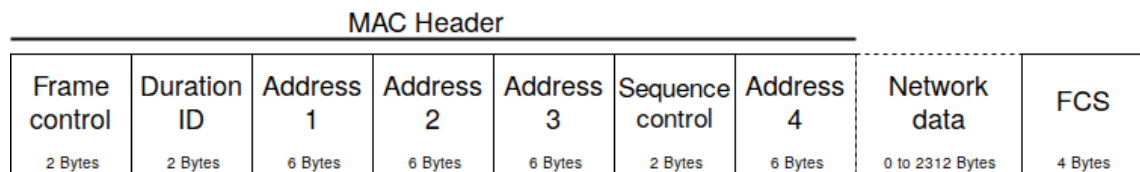


Obr. 3.1: Reprezentace Wi-Fi kanálů pásem 2,4000-2,4835 GHz [22]

#### 3.1.1 Wi-Fi rámec

Wi-Fi komunikace se řídí jednoduchým principem, kdy se každý rámec skládá z MAC hlavičky (30 Bytů), samotnými daty (až 2312 Bytů) a nakonec čtyřmi byty FCS (Frame Check Sequence), které mají za úkol detekovat chybu přenosu. Celý rámec je znázorněn na obrázku 3.2. MAC hlavička v sobě uchovává většinu potřebných

dat, která jsou potřeba k rozlišení vysílacího zařízení. Právě tento údaj je potřebný pro správnou identifikaci vysílače. Každé zařízení má své unikátní označení v podobě MAC adresy, která je typická svým tvarem 01:23:45:67:89:ab. Pro zjištění unikátního jména vysílače, je potřeba z MAC hlavičky zjistit právě adresu č. 2, která je definována jako adresa zdroje. [60]



Obr. 3.2: 802.11 frame [60]

## 3.2 Testování hotových řešení

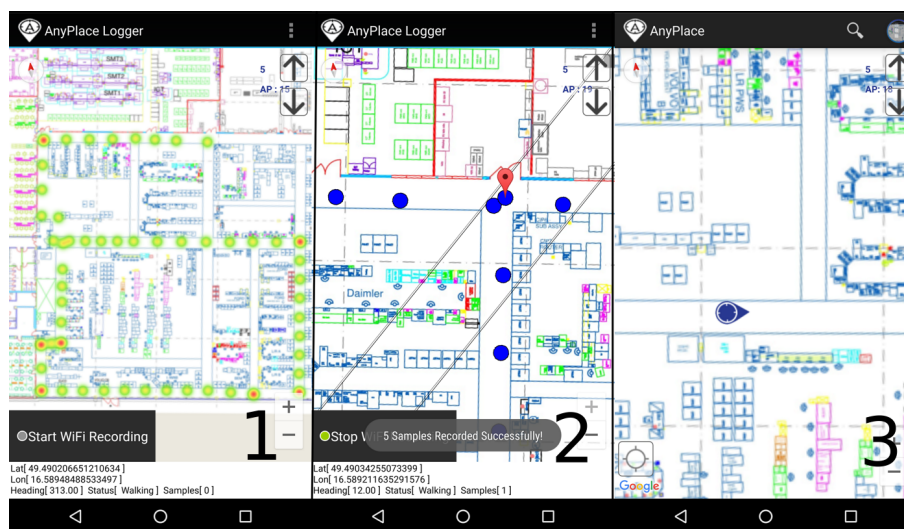
Otestovat přesnost metody vnitřní lokalizace lze za pomoci již naprogramovaných aplikací pro mobilní telefony Android. Přesnost zaměření však závisí na použitém zařízení. Mnoho lokalizačních aplikací nacházejících se na veřejném uložšti *Google Play* [21] určují lokaci nejen na bázi Wi-Fi technologie. Většinou využívají i ostatních senzorů, kterými disponuje mobilní telefon (akcelerometr, magnetometr, či gyroskop). Na základě požadavků a snahy napodobit podmínky měřicího tagu, byly vybrány dvě aplikace, které navíc disponují veřejně dostupnou dokumentací jak aplikace, tak serverové části systému. V následujících podkapitolách jsou jednotlivé aplikace otestovány v reálných podmínkách. Výsledkem je pak jejich porovnání a vyhodnocení.

### 3.2.1 Anyplace

Systém *Anyplace* je jeden z prvních volně šiřitelných systémů vnitřních navigací fungujících na bázi Wi-Fi a inerciálních senzorů. *Anyplace* byl vyvinut studenty a výzkumníky z ústavu počítačových věd na Kyperské univerzitě [53]. Celá aplikace včetně serverového řešení je publikována jako volně šiřitelný software pod licencí MIT [38].

Celý systém se skládá ze dvou částí. První část slouží pro namodelování budovy skrze webové rozhraní pojmenované Architekt. Jde vesměs o interaktivní mapu společnosti *Google*, do které se upevní plánec budovy, nastaví průchozí body, spolu s popisky různých lokalit. Aplikace umožňuje vytvářet i vícepatrový návrh, kde je

možné ke každému patru přiřadit vlastní plánek. Druhou částí *Anyplace* je vlastní aplikace do mobilních telefonů Android. Aplikace slouží jak k zmapování úrovní signálů (offline část), tak k samotné lokalizaci (respektive navigaci). [2]



Obr. 3.3: Aplikace Anyplace 1 - stav zaznamenaných Wi-Fi signálů, 2 - zaznamenávání Wi-Fi signálů, 3 - lokalizační část

Systém byl otestován pro prostory společnosti Alps Electric Czech s.r.o. Postupovalo se dle pokynů tvůrce programu [79]. Nejprve byla vytvořena mapa budovy se všemi podklady v prostředí Architekt na veřejném Anyplace serveru. Následně byla nainstalována mobilní aplikace, kde se nastavila požadovaná budova a patro. Nejdříve bylo nutné zmapovat úrovně signálů Wi-Fi vysílačů v budově. Měření se soustředilo především na prostředí výrobní haly, kde bude výsledný lokalizační systém využíván. Po zmapování oblasti je možné využívat samotných lokalizačních vlastností aplikace.

Na obrázku 3.3 jsou znázorněny všechny tři stavy aplikace. První stav znázorňuje již zmapovaná místa, s možností zahájení mapování nového (čím vícekrát se proces mapování provede, tím je výsledná přesnost větší). V části druhé je znázorněn proces mapování. Mapování probíhá tak, že uživatel se s telefonem pohybuje po přímkách. Pokaždé, co se zařízení v prostoru otočí, je nutné upřesnit jeho polohu kliknutím na přesné místo na mapě. Tím se přidá referenční bod do databáze systému. V části třetí je ukázána vlastní lokalizace mobilního telefonu v prostoru, kde modrá tečka ukazuje aktuální pozici v prostoru.

Během testu byl chyba lokalizace silně proměnlivá. Ve většině případů se chyba pohybovala v rozmezí 2 až 10 m, v ojedinělých případech však došlo k zaměření lišícím se od skutečné pozice až o několik desítek metrů.

Kvůli koncepci navigačního systému *Anyplace* nebylo možné provést přesnější a opakovatelné měření, které by bylo vztaženo například k reálné čtvercové síti, díky které by bylo možné matematicky určit jeho přesnost. Navíc bylo zjištěno, že systém při lokalizaci současně využívá inerciální senzory mobilního telefonu a při vlastní lokalizaci nekomunikuje se serverovou částí, protože si veškerá data uchovává v interní paměti, což neodpovídá navrhované koncepci vyvíjeného lokalizačního zařízení.

### 3.2.2 Find

Lokalizační nástroj *Find* je dalším testovaným řešením, které je volně šiřitelné pod licencí *AGPL* [19] a podporuje mobilní telefony s operačním systémem *Android*. Architektura systému se skládá ze dvou základních bloků. Prvním blokem je blok aplikační (klientský). Základní úlohou klientského bloku je jednak odesílání učicích dat na serverovou část (druhý blok), ale také část lokalizační, která přijímá ze serverové části výsledky výpočtu polohy.

Druhým blokem je blok serverový. Tento blok se stará o shromažďování veškerých příchozích učicích dat do databáze. Obsahuje také jednoduchou správu přes webové rozhraní, které slouží pro přehled nasnímaných lokací, či poslední známou polohu jednotlivých klientských zařízení. Hlavní úlohou je však analýza získaných dat, která se provádí metodou náhodný les 2.4.3. Výsledek strojového učení je poté zpracováván s příchozími lokalizačními daty. Výsledkem je poté určená pozice konkrétního zařízení, která se odesílá jako odpověď na odeslaná data klientským blokem.[18]

Přestože je systém koncipován pro účely zjišťování pozice v budově při přesnosti odpovídající rozdělení na jednotlivé místnosti, byl otestován také ve výrobních prostorách firmy Alps Electric s.r.o.. Protože je možné nadefinovat libovolný počet bodů, které je možné následně dohledat, byla pro tyto účely vytvořena na podlaze testovacího prostoru čtvercová síť  $8 \times 8$  čtverců o rozměrech čtverce  $65 \times 65$  cm (příloha č. A.1), odpovídající velikosti testovacího vozíku, na kterém byl umístěn mobilní telefon.

Měření probíhala ve dvou krocích. Nejdříve byl test proveden pro každý čtverec sítě ( $8 \times 8$ ). S ohledem na vysokou chybu zaměření pak byl proveden další test používající sloučené buňky v síti  $4 \times 4$ .

V této sloučené síti byl v každém bodu po dobu deseti minut spuštěn učicí mód mobilní aplikace *Find*. Časový interval byl zvolen z důvodu nasbírání co největšího množství vzorků úrovní signálů jednotlivých Wi-Fi vysílačů. Hodnoty úrovně signálů vybraných vysílačů jsou vidět v příloze A.2, ve které je znázorněna tepelná síť naměřených úrovní.

Pro správnou analýzu byl také dopočítán rozptyl úrovní signálu v čase (příloha A.3) a také směrodatná odchylka (příloha A.4). Z těchto grafů je zřejmé, že síla

jednotlivých Wi-Fi rámců relativně kolísá v čase a na daném testovacím prostoru je obtížné z těchto hodnot extrahovat informaci pro jednoznačné určení polohy.

V dalším kroku bylo provedeno měření v jednotlivých zmapovaných bodech. Jak již napovídaly mapy úrovní, klasifikační algoritmus systému *Find* v tomto prostoru nedokáže jednoznačně určit pozici a výsledky jsou zatíženy značnou chybou. Výstupy jsou obsaženy v tabulce D.1 do které jsou dopočítány hodnoty maximálních chyb v určování jednotlivých bodů. Zároveň je zde uvedena úspěšnost správného rozpoznání pozice v čase. Úspěšnost správného hledání bodů je znázorněno v teplotním grafu v příloze A.5. V grafu je znázorněna šachovnice procentních úspěšností pro každý z 16 hledaných bodů. Největší chyba byla zaznamenána v bodě *D4*, ve kterém systém *Find* na chvíli detekovat pozici *A1*, což způsobilo chybu 5,52 m. Nejlépe na tom byl bod *D1*, který byl určen po celou dobu měření správně.

Zpětně je nutno dodat, že zvolená metoda testování má několik nedostatků. Pouhým sloučením buněk sítě může dojít ke zvýšení přesnosti buďto díky větší diferenciaci v hodnotách intenzit signálů, nebo jen díky tomu, že klasifikátor rozhoduje z menšího množství možností. Metoda zde použitá není schopna tyto dva jevy od sebe oddělit - k tomu by bylo nutné zvětšit celkové rozměry sítě, aby byl zachován stejný počet buněk jako v síti 8 x 8.

V následujících krocích vývoje systému proto bylo nutné zvětšit plochu testovacího prostoru. Dosavadní postup však přesto poskytl cenné informace pro další postup.

Protože se chyba určení u tohoto systému pohybuje v relativně velkých číslech, byla nasnímaná síť eliminována na dvojnásobnou vzdálenost jednotlivých bodů. Výsledek je vidět v tabulce 3.2, kde je zřejmé zlepšení přesnosti i procentní stability určení.

### 3.2.3 Vyhodnocení

Z testů hotových Wi-Fi lokalizačních systémů probraných v předchozích podkapitolách je zřejmé, že u systému *Anyplace* 3.2.1, ani systému *Find* 3.2.2 nelze očekávat chybu určení pozice menší než 2 m. Proto je vhodné pro zpřesnění výpočtů lokalizačního systému přidat dodatečnou lokalizační technologii, která však v ideálním případě nepotřebuje žádné aktivní vysílací prvky. Tyto požadavky splňuje technologie stavějící na měření magnetických veličin 1.1.1. [56] Díky dalšímu vstupu je možné eliminovat proměnlivé a v prostoru opakující se nedokonalosti Wi-Fi technologie.

Tab. 3.1: Naměřené hodnoty systému Find šachovnice  $4 \times 4$

		Nejčastěji určované			Maximální chyba	
	Úspěšnost [%]	Bod	Četnost [%]	Chyba [m]	Bod	Chyba [m]
<b>A1</b>	30,00	A1	30,00	0,00	D1	3,10
<b>A2</b>	26,09	A4	26,10	2,60	D1	4,11
<b>A3</b>	16,17	C1	25,00	3,68	D1	4,69
<b>A4</b>	4,17	C2	25,00	3,68	D2	4,49
<b>B1</b>	16,67	D1	25,00	2,60	D3	3,68
<b>B2</b>	3,45	C1	37,93	1,84	C1	1,84
<b>B3</b>	4,00	C1	40,00	2,91	D2	2,91
<b>B4</b>	28,00	A3	36,00	1,84	A2	2,91
<b>C1</b>	48,00	C1	48,00	0,00	A4	4,69
<b>C2</b>	18,18	B1	45,46	1,84	A2	2,60
<b>C3</b>	4,35	D2	60,87	1,84	A2	2,91
<b>C4</b>	23,81	B4	42,86	1,30	A4	2,60
<b>D1</b>	100,00	D1	100,00	0,00	-	-
<b>D2</b>	17,39	C2	21,74	1,30	A4	4,69
<b>D3</b>	9,52	B4	52,38	2,91	A4	4,11
<b>D4</b>	21,74	D4	21,74	0,00	A1	5,52

Tab. 3.2: Naměřené hodnoty systému Find při zvětšení rozestupů

		Nejčastěji určované			Maximální chyba	
	Úspěšnost [%]	Bod	Četnost [%]	Chyba [m]	Bod	Chyba [m]
<b>A1</b>	82,76	A1	82,76	0,00	D1	3,10
<b>A4</b>	62,09	A4	62,09	0,00	D4	3,10
<b>D1</b>	68,96	D1	69,96	0,00	A1	3,90
<b>D4</b>	72,41	D4	72,41	0,00	A4	3,10

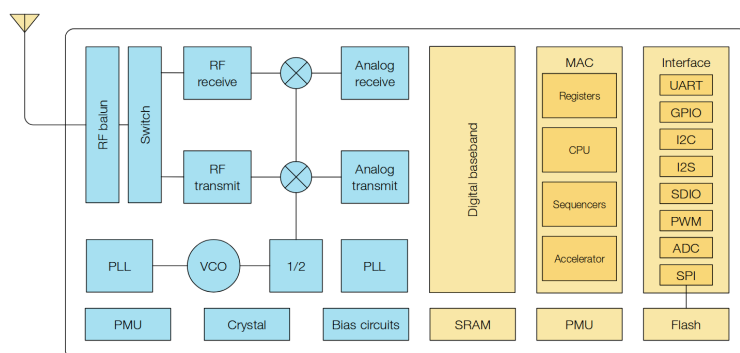
## 4 HARDWAROVÝ NÁVRH LOKALIZÁTORU

Návrh lokalizačního zařízení se řídí podmínkami stanovenými v předchozích kapitolách. Jedná se o bateriově poháněný Wi-Fi modul s možností dobíjení a zjištění stavu baterie. Zařízení musí být úsporné natolik, aby vydrželo fungovat alespoň 12 hodin. V následujících podkapitolách je proto zdůvodněn a popsán výběr hlavního obvodového prvku spolu se všemi přídatnými obvody včetně jejich schematické implementace.

### 4.1 Wi-Fi konektivita ESP8266

Hlavním obvodovým prvkem, který zajišťuje jak Wi-Fi komunikaci, tak řízení veškerých periferních obvodů byl vybrán integrovaný systém firmy Espressif [16] s označením *ESP8266*. Toto řešení bylo vybráno z důvodu snadné dostupnosti, nízké pořizovací ceny, dobré dokumentace a poskytovaným implementačním nástrojům.

Centrální částí obvodu *ESP8266* je 32 bitové mikroprocesorové jádro *Tensilica L106* běžící na nastavitelné frekvenci 80 až 160 MHz. Obsahuje několik vstupně/výstupních periférií, včetně podpory protokolů jako jsou SPI, I2C, UART a další. Systém obsahuje také jeden A/D převodník s maximálním vstupním rozsahem 1 V (1024 napěťových úrovní). Vnitřní mikroprocesor disponuje 96 KB paměti RAM, reálně je však pro potřeby aplikace možné využít 45 KB, zbývající paměť je alokována pro potřeby Wi-Fi stacku. Podpora specifikace 802.11 (Wi-Fi) je ve verzích b/g/n/d/e/i/k/r. Na obrázku 4.1 je znázorněno jeho blokové schéma *ESP8266*, kde je žlutě vyznačena digitální část a modře část analogová. [15]



Obr. 4.1: Blokové schéma ESP8266 [15]

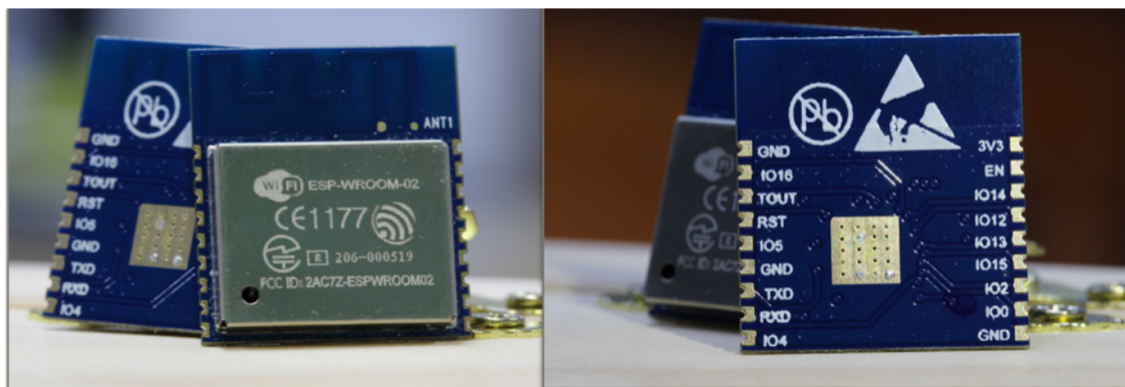
Vstupně-výstupní logika je na úrovni 0 - 3,3 V a zároveň funguje na stejném napájecím napětí. Jeho udávaná proudová spotřeba se pohybuje od 10  $\mu A$  do 170 mA.



Nejnižší hodnoty odběru systém dosahuje pouze při použití jednoho ze tří spánkových funkcí. Pro zaručení funkčnosti je nutné připojit flash paměť. [15]

#### 4.1.1 Modul ESP-WROOM-02

*ESP-WROOM-02* je  $18 \times 20\text{ mm}$  modul obsahující čip *ESP8266*. Má implementovanou anténu ( $2,4\text{ GHz}$ ) na desce plošných spojů s udávaným ziskem  $2\text{ dBi}$ . Jeho hlavní výhodou oproti ostatním modulům s tímto čipem je jeho plná certifikace spolu s přehlednou dokumentací. Uvnitř modulu se nachází také generátor hodinového signálu o frekvenci  $26\text{ MHz}$ , flash paměti o velikosti  $2\text{ MB}$  a ostatní pasivní prvky nutné ke správné funkci obvodu. Celý modul obsahuje 18 vstupně výstupních pinů a je zobrazen na obrázku 4.2. [14]



Obr. 4.2: Modul ESP-WROOM-02 [14]

Modul garantuje správnou funkčnost od  $2,7$  do  $3,6\text{ V}$  napájecího napětí (typicky  $3,3\text{ V}$ ). Jeho průměrná spotřeba je  $80\text{ mA}$ , která se dá nejvíce snížit až na  $20\text{ }\mu\text{A}$  při módu tvrdého spánku (mód vypnutého modemu pak  $15\text{ mA}$ ). Uživatelský kód lze uložit do již zmiňované paměti flash, ale pouze o velikosti  $1\text{ MB}$  kvůli hardwarovému omezení. Zbytek paměti lze zaplnit uživatelskými daty. Modul se programuje přes UART rozhraní, které zajišťuje také funkci debuggeru. [14]

## 4.2 Napájení

Napájení zařízení je nedílnou součástí elektronického návrhu. Aby byly splněny vstupní požadavky na výdrž, musí být vybrána správná baterie, spolu s obvodem pro její nabíjení. Plně nabitá baterie má většinou jiný rozsah napětí, než je potřebný pro napájení zařízení. Navíc se napětí s časem provozu postupně mění. Proto se musí do návrhu zakomponovat prvek, který udržuje napětí konstantní.

### 4.2.1 Baterie

S ohledem na celkovou velikost zařízení bylo rozhodnuto použít Li-Po (Lithium-polymer), popřípadě Li-Ion (Lithium-Ionové) baterie. Nominální hodnota napětí jednoho článku je  $3,7\text{ V}$ , což dostačuje pro využití v diskutovaném lokalizačním zařízení. Plně nabitý článek má až  $4,23\text{ V}$ , pokud klesne napětí pod  $2,7\text{ V}$ , může být nenávratně zničen. Proto je zvolena jednočláneková baterie u které se bude dodržovat minimální hodnota napětí v okolí  $3,3\text{ V}$ . [26]

### 4.2.2 Nabíjení

Z hlediska jednoduchosti a využití stávajících zdrojů bylo rozhodnuto využít pro nabíjení USB rozhraní, tedy napětí  $5\text{ V}$ . Pro správu nabíjení byl vybrán obvod *MCP73832*, který je uzpůsoben pro Lithium-Ionové a Lithium-Polymerové jednočlánekové baterie. Obvod pracuje s maximálním napájecím napětím  $6\text{ V}$  a je schopen nabíjet přednastaveným proudem  $15 - 500\text{ mA}$ . Pro jeho správnou funkci stačí použít pouze 4 pasivní obvodové prvky. Obvod umožňuje sledovat teplotní stabilitu baterie. [48]

### 4.2.3 Napájecí obvody

Modul *ESP-WROOM-02* požaduje pro svůj chod typickou hodnotu napětí  $3,3\text{ V}$ . Vezmeme-li v úvahu, že je výstupní napětí baterie maximálně  $4,23\text{ V}$ , které je navíc s časem proměnlivé, je zřejmé, že napětí baterie musí být dále upraveno. To se dá zajistit například použitím lineárních regulátorů, nebo DC-DC spínaných regulátorů, charakteristické vyšší účinností. [10]

Při výběru byl kladen důraz na maximální výstupní proud nad  $250\text{ mA}$ . Pro svou účinnost byl pro správu napětí zvolen DC-DC obvod *LM3670MF-3.3* s pevným  $3,3\text{ V}$  výstupním napětím a maximálním výstupním proudem  $350\text{ mA}$ . Jeho hlavní výhodou je dále nízký klidový odběr  $15\text{ }\mu\text{A}$ . Dále byla přidána možnost změnit zdroj napájení na obvod *HT7333* který bude s druhým obvodem při ožívování porovnávat a v závislosti na parametrech zvolen ten s lepšími parametry. [27] [28]

## 4.3 Akcelerometr a magnetometr

Hned v úvodu práce je diskutována co největší výdrž lokalizátoru na baterii. Ta je zajištěna jen tehdy, když lokalizátor údaje o své poloze neodesílá neustále. Nabízí se tedy měřit data pouze v případě, kdy se lokalizátor pohybuje. K takové detekci může sloužit například akcelerometr. Výstup akcelerometru je možné využít jako

přerušení pro mikrokontrolér ve Wi-Fi modulu, který následně pracuje podle zvoleného algoritmu. Dalším využitím akcelerometru je detekce poklepání. Tato funkce eliminuje nutnost přidání externího tlačítka pro volbu módů. Dále je vhodné pro zpřesnění výpočtů využít magnetometr, který bude využit k zpřesnění dopočítané lokace při využití magnetických anomálií budovy.

Z požadavků vzešel obvod *LSM303AGR*, který obsahuje v jednom pouzdře jak tříosý akcelerometr, tak tříosý magnetometr. Obvod komunikuje po I2C nebo SPI sběrnici. Dále obsahuje dva programovatelné vyvolávače přerušení, které budou jednak budit mikrokontrolér, ale také detekovat poklepání. Ve vysokorychlostním módu dokáže komunikace na I2C probíhat až na  $3,4\text{ MHz}$ . [29]

## 4.4 Programátor a debugger

V technické dokumentaci k modulu *ESP-WROOM-02* je specifikována metoda debugování a programování přes rozhraní UART. Veškerá komunikace probíhá na logických úrovních 0 až  $3,3\text{ V}$ . Pro spojení s počítačem je třeba vybrat takový obvod, který dokáže konvertovat  $5\text{ V}$  logiku na požadovaných  $3,3\text{ V}$ . Veškerá požadavky splňuje obvod *CP2102*, který převádí komunikaci s USB na UART. Jeho napájecí napětí se pohybuje v rozmezích  $3 - 3,6\text{ V}$ . Výhodou je nezávislost obvodu na  $5\text{ V}$  USB logice. Reálně se bude programátor v lokalizační jednotce využívat pouze při vývoji a oživování, jeho cenová náročnost proto u výsledného zařízení nehraje významnou roli. [8]

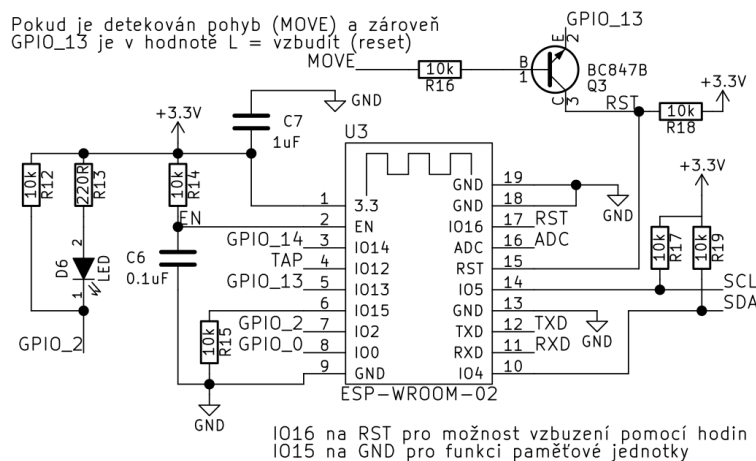
## 4.5 Schematický návrh

Pro lepší pochopení funkce bylo schematické zapojení rozděleno na zapojení jednotlivých funkčních bloků. Celé schéma je součástí přílohy B.1.

**Wi-Fi modul** je znázorněn na obrázku 4.3. Pro správný chod je třeba připojit jen malé množství pasivních součástek. Velice důležité je připojení vstupně/výstupního pinu 15 přes rezistor k zemi. Tento krok totiž definuje z jaké paměti se má startovat (logická nula značí startování z interní flash paměti). K modulu je také připojena jedna LED, která je připojena k multifunkčnímu vstupně/výstupnímu pinu 2. Tento pin totiž zajišťuje startovací sekvenci, která je definovaná úrovní H, což zajišťuje rezistor R12.

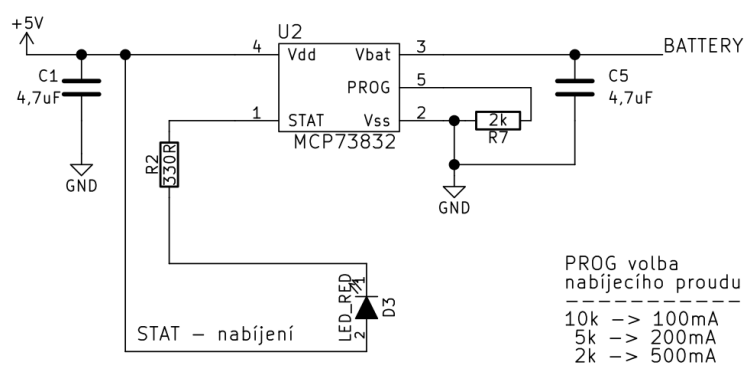
Další důležitou logikou je zde možnost probouzet modul z hlubokého spánku. K tomu slouží jednak vstupně/výstupní pin 16, který musí být přiveden na **reset**.

Zároveň je zde implementovaná logika probouzení při detekování pohybu z akcelerometru. Vygenerovaný impuls otevře tranzistor Q3, který přivede logickou hodnotu ze vstupně/výstupního pinu 13 na reset. Pokud tedy nastane přerušení akcelerometru a zároveň bude na diskutovaném pinu úroveň L, nastane požadovaný reset, který modul probudí z hlubokého spánku. Rezistory R17 a R19 zajišťují správnou funkci sběrnice I2C, která komunikuje s inerciálními senzory.



Obr. 4.3: Schéma zapojení Wi-Fi modulu

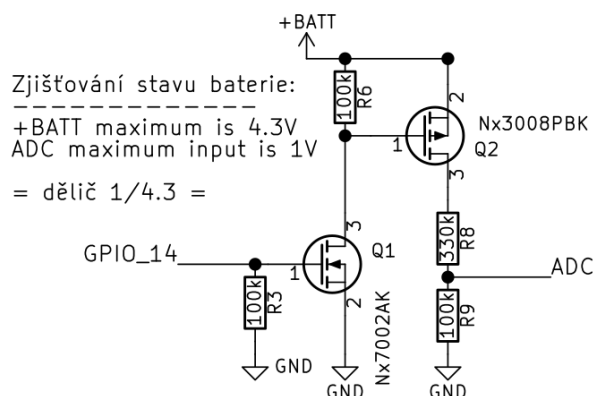
**Nabíjení baterie** je zajištěno obvodovým zapojením, které je znázorněno na obrázku 4.4. Zapojení disponuje LED indikátorem, který signalizuje stav nabíjení. Rezistor R7 je předurčen k určení velikosti nabíjecího proudu. Použité kapacitory mají filtrační vlastnosti. Na výstupní část (značeno BATTERY) je připojen pozitivní kontakt baterie.



Obr. 4.4: Schéma zapojení nabíjecího obvodu

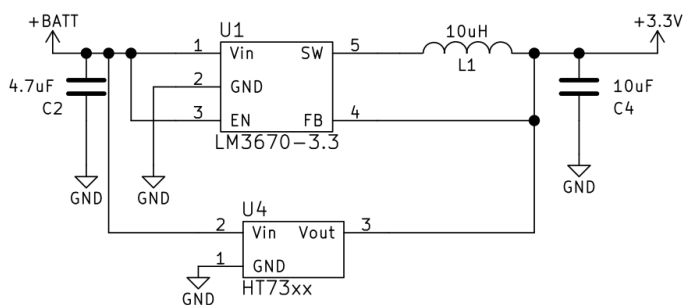
**Měření stavu baterie** je požadovanou součástí zapojení. Jeho schematický návrh je zobrazen na obrázku 4.4. Stav baterie je měřen skrze analogově/digitální

převodník Wi-Fi modulu *ESP-WROOM-02* s rozlišením 0 - 1,0 V. Baterie má však v nejlepším případě až kolem 4,3 V. Proto je použito jednoduché zapojení rezistorů jako děliče napětí  $\frac{1}{4,3}$ , což zajistí maximální hodnotu napětí 1 V na převodníku. Protože má být zařízení energeticky nenáročné, je dělič navržen tak, aby ním neprotékal téměř žádný proud. Tranzistory Q1 a Q2 navíc omezují průtok proudu děličem pouze v případech, kdy se stav baterie reálně měří (ovládáno skrze vstupně/výstupní pin 14).



Obr. 4.5: Schéma zapojení měření stavu baterie

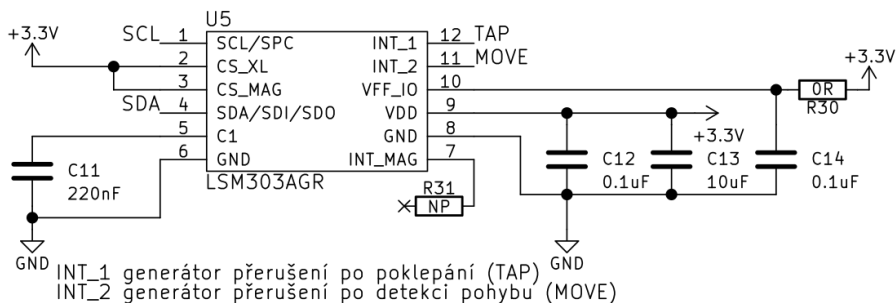
**Zdroj 3,3 V** obsahuje pouze čtyři prvky. DC-DC regulátor, cívka a dva filtrační kondenzátory. Celé zapojení je zobrazeno na obrázku 4.6. Vývod EN povoluje výstup regulátoru (3,3 V). Velice důležité je také propojení zpětné vazby (FB), která musí být v reálném návrhu plošného spoje co nejkratší kvůli přesné stabilizaci. Případnou alternativou je zapojení obvodu *HT7333* místo již zmiňovaného DC-DC regulátoru.



Obr. 4.6: Schéma zapojení 3,3 V napájecího zdroje

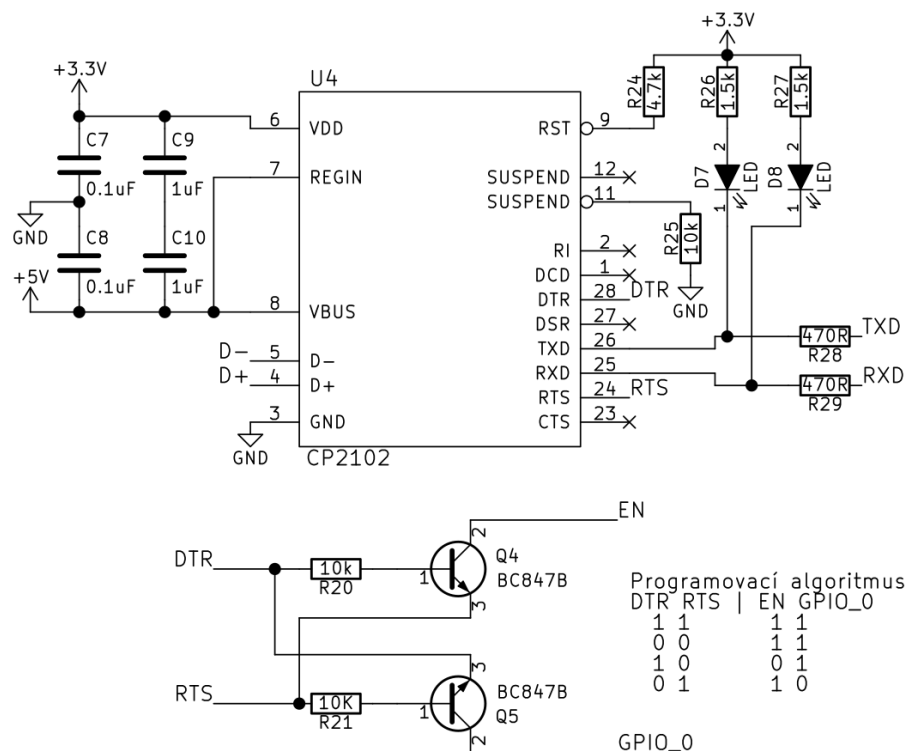
**Inerciální senzory** zajišťují veškerá měření díky jednoduchému zapojení, které

je znázorněno na obrázku 4.7. K zprostředkování komunikace byla vybrána sběrnice I2C, jejíž výběr je definován připojením  $3,3\text{ V}$  na vstupy CS. Obvod je doplněn pouze filtračními kapacitami, které zajišťují jeho stabilní funkci. Rezistor připojený k výstupu INT slouží pouze pro testovací účely.



Obr. 4.7: Schéma zapojení inerciálních senzorů

**Programovací rozhraní** potřebuje pro svoji funkci UART komunikaci a  $3,3\text{ V}$  logiku. Obvodové zapojení komunikačního čipu *CP2102* je zobrazeno na obrázku 4.8. Kondenzátory C7 - C10 jsou v obvodu umístěny kvůli filtraci vstupního napětí ( $5\text{ V}$  z USB a  $3,3\text{ V}$  z DC-DC regulátoru). LED D7 a D8 jsou do zapojení přidány především pro účely ladění programu. Znázorňují komunikaci mezi počítačem a Wi-Fi modulem. Programování může začít pouze tehdy pokud je dodržena kombinace logických úrovní na Wi-Fi modulu (vstup EN a vstupně/výstupní pin 0). Diskutovaná kombinace je zajištěna jednoduchým tranzistorovým zapojením.



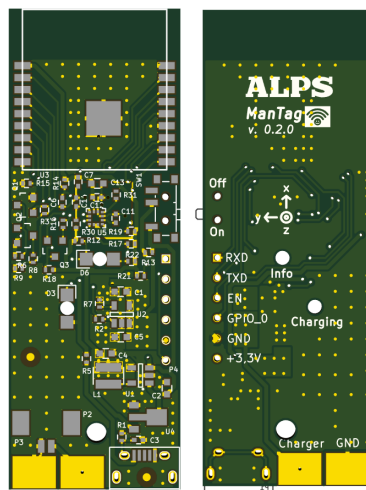
Obr. 4.8: Schéma zapojení programátoru

## 4.6 Návrh plošného spoje

Výsledné lokalizační zařízení je koncipováno tak, aby bylo co nejmenších rozměrů. Tomu se musí přizpůsobit také celý návrh plošného spoje. Výkonová náročnost periferií není náročná a proto byly vybrány pasivní součástky velikosti 0402. Aktivní obvody byly taktéž vybírány s ohledem na konečné rozměry. Velikost však nezávisí pouze na použitých součástkách. Velkou roli hraje také baterie, která by neměla spolu s dalšími prvky zasahovat do anténní části Wi-Fi modulu *ESP-WROOM-02*.

Výsledný návrh je znázorněn na obrázku 4.9. Rozměry návrhu jsou 59,97 mm na výšku a 21,41 mm na šířku. Tyto rozměry odpovídají také předpokládané 300 mAh Li-Po baterii, kterou je možné připojit jednak ke konektoru, nebo připájet napevno k externím ploškám. Deska plošných spojů slouží rovněž jako horní část zapouzdření (viz kapitola 4.7) o čemž svědčí především použité indikační LED, které jsou otočené skrz desku. V návrhu nechybí univerzální nabíjecí plošky, umožňující na desce vynechat nabíjecí obvod, který by byl připojen k zařízení externě pouze v případě nabíjení. Programování, respektive UART komunikace spolu se správou externího napájení je řešena prokovenými otvory, do kterých se v případě použití zasunou pouze propojovací jehly. Na desce je také potiskem označena orientace a pozice akcelerometru s magnetometrem. Do návrhu jsou implementovány dva fiduciály, které

umožní jednodušší automatizované osazování. Plošný spoj byl pro výrobu panelizován po čtyřech kusech a vyroben na FR-4 desku o tloušťce  $1,6\text{ mm}$  s povrchovou úpravou HASL (Hot Air Solder Leveling). Spolu s deskami byla vyrobena také šablona pro nanášení pájivé pasty pro usnadnění manuální povrchové montáže.



Obr. 4.9: Návrh plošného spoje. Strana součástek na levém obrázku.

## 4.7 Návrh zapouzdření

Pro zapouzdření malého zařízení, které se nebude vyrábět ve velkém množství se nabízí využít technologii 3D tisku. Jak bylo diskutováno v kapitole zabývající se návrhem plošného spoje 4.6, bude jako víko budoucí krabičky sloužit samotný plošný spoj, který disponuje pouze jedním montážním otvorem.



Obr. 4.10: Návrh zapouzdření pro 3D tiskárnu.

Výsledný design krabičky je znázorněn na obrázku 4.10. Při jejím návrhu byla zvolena tloušťka stěny  $1,5\text{ mm}$ , která při celkově malých rozměrech krytu ( $24,6\text{ mm} \times 63,5\text{ mm} \times 12,5\text{ mm}$ ) se zaoblenými hranami zaručuje pevnost a estetickou celistvost. Pro výrobu jedné krabičky je potřeba  $5,3\text{ mm}^3$  materiálu.



## 5 ZÁKLADNÍ OŽIVENÍ ZAŘÍZENÍ

Po přetavení osazeného plošného spoje bylo zařízení připojeno k laboratornímu zdroji s nastavenou proudovou kompenzací  $350\text{ mA}$  což je teoretické maximum i rezerva odběru modulu *ESP-WROOM-02*. Tím byla zajištěna relativní ochrana v případě chybného zapojení či osazení. Po zapnutí zdroje bylo proměřeno výstupní napětí z napěťového regulátoru, které bylo na správné hodnotě  $3,3\text{ V}$ . Po připojení UART rozhraní se Wi-Fi modul hlásil. V následujícím kroku byla připojena baterie a otestován nabíjecí obvod. Ostatní funkcionality zařízení jako je měření stavu baterie, či komunikace s inerciální jednotkou *LSM303* mohou být ověřeny pouze instrukcemi vykonávajícími modulem *ESP-WROOM-02*. V dalších podkapitolách je proto diskutován výběr vhodného programovacího jazyka (respektive SDK - Software development kit) ve kterém bude zařízení programováno. Dále jsou provedeny základní měření prověřující stabilitu, funkčnost a předpokládanou spotřebu zařízení.

### 5.1 Výběr programovacího jazyka

Existuje několik programovacích jazyků podporovaných modulem *ESP-WROOM-02*. Základem je jazyk *C*. V moderních mikrokontrolérech je možnost využít programovacích jazyků vyšší úrovně, které vývoj a prototypování zařízení urychlí. Mezi tyto moderní programovací platformy patří například *NodeMCU* s programovacím jazykem *Lua*, či *Espruino* s programovacím jazykem *JavaScript*. Další velice schopnou platformou je projekt *MicroPython*. Jedná se o úspornou implementaci známého programovacího jazyka *Python 3*, která v sobě obsahuje základní knihovny pro práci se sítěmi, textem, veškerou správu mikrokontroléru a mnoho dalších funkcí. Velikou výhodou tohoto projektu je velice dobře napsaná dokumentace spolu s velkou uživatelskou základnou. [41] [17] [34]

Protože projektem požadovaná funkcionalita není nijak komplexní a náročná, bylo vhodné pro vývoj použít programovací jazyky vyšších úrovní. Pro svou jednoduchost a přehlednost byla pro potřeby lokalizačního tagu vybrána právě aktivně vyvíjená platforma *MicroPython*.

#### 5.1.1 MicroPython

*MicroPython* je navržený tak aby byl schopen běžet i na zařízeních s omezenou velikostí paměti. Minimální požadavky jsou specifikovány na  $256\text{ kB}$  paměti pro programovou část a  $16\text{ kB}$  paměti RAM (Random-Access memory). Všechny tyto minimální požadavky modul *ESP8266 (ESP-WROOM-02)* převyšuje, proto je možné pokračovat v samotné implementaci.

Z oficiálních stránek projektu byl získán předkompilovaný firmware *MicroPython* pro modul *ESP8266*, zvolena byla verze 1.9.3. Pro nahrání staženého firmwaru se využívá předvytvořeného *Python* nástroje *esptool*, který je distribuovaný například skrze službu *pip*. Program *esptool* se využívá k naflashování jakéhokoliv zde zmiňovaného firmwaru. První oživení Wi-Fi modulu se dá shrnout do následujících kroků demonstrovaných *BASH* příkazy spouštěnými v operačním systému Linux (distribuce *Ubuntu*). Příklad 5.1 předpokládá připojení programovacího rozhraní na *ttyUSB0*. [36]

Výpis 5.1: Příklad nahrání firmwaru do modulu ESP-WROOM-02.

```

1 # instalace flashovacího programu
2 pip3 install esptool
3 # stazeni MicroPythonu
4 wget http://micropython.org/resources/firmware/esp8266-2017\
5 1101-v1.9.3.bin
6 # smazani flash pameti modulu ESP-WROOM-02
7 esptool.py --port /dev/ttyUSB0 erase_flash
8 # flash MicroPython firmwaru do modulu ESP-WROOM-02
9 esptool.py --port /dev/ttyUSB0 --baud 460800 write_flash\
10 --flash_size=detect 0 esp8266-20171101-v1.9.3.bin

```

Po úspěšném nahrání a následném restartování mikroprocesoru se *MicroPython* automaticky nastartuje do režimu REPL (Read Evaluate Print Loop). Užití tohoto režimu je vhodné zejména pro nejjednodušší a nejrychlejší otestování vlastních programů a příkazů. Existují dvě varianty přístupu do REPL režimu a to díky UART sběrnici připojené k modulu a počítači. V příkazové řádce počítače stačí spustit například program *Picocom* 5.2.

Výpis 5.2: Komunikace a základní příkazy pro správu mikrokontroléru.

```

1 # instalace programu picocom
2 apt-get install picocom
3 # otevreni uart komunikace pro zarizeni ttyUSB0
4 sudo picocom /dev/ttyUSB0 -b115200

```

Druhou možností jak přistoupit k REPL módu je využít jeho webovou verzi, tu je ale nutné aktivovat skrze UART REPL. Po aktivaci módu se stačí k zařízení přihlásit a pokračovat skrze před vytvořeného webového REPL klienta. [37]

Vstupní body programu v platformě *MicroPython* jsou sobory *boot.py* a následně *main.py*, které se vyvolají po startu systému.

Pro správu souborového systému se využívá webová verze REPLu, nebo častěji program *Ampy*, který systém spravuje skrze UART rozhraní. Pro veškerou správu

souborového systému skrze program *Ampy* postačí několik málo příkazů (ukázka v 5.3).

Výpis 5.3: Základní příkazy pro správu souborového systému v MicroPythonu

```
1 # instalace programu ampy
2 pip3 install adafruit-ampy
3 # stazeni souboru boot.py
4 sudo ampy --port /dev/ttyUSB0 -b115200 get boot.py .
5 # smazani souboru boot.py
6 sudo ampy --port /dev/ttyUSB0 -b115200 rm boot.py
7 # nahraní nového souboru boot.py
8 sudo ampy --port /dev/ttyUSB0 -b115200 put boot.py
```

## 5.2 Měření stavu baterie

Měření stavu baterie je navrženo v kapitole 4.5. Pro zpřístupnění funkce měření je nutné nastavit vstupně/výstupní pin 14 na logickou úroveň H a následně přes knihovnu *adc*, která je součástí *MicroPythonu* vyčíst její aktuální napěťovou hodnotu. Tuto hodnotu je nutné korigovat vzhledem k předřazenému děliči. Protože je k zařízení připojena Li-Po baterie, která disponuje nominální napěťovou hodnotou v nabitém stavu v okolí 4,2 V je maximální hodnota, respektive výstup z převodníku 1024 přiřazena právě této hodnotě. Minimální hodnota je poté z důvodu vybíjecí charakteristiky baterie, ale také limitním vlastnostem Wi-Fi modulu spolu s regulátorem napětí nastavena na napětí 3,2 V, respektive hodnoty převodníku 780. Bylo rozhodnuto, že jakmile hodnota stavu baterie dosáhne minimální hodnoty (780), je nutné uvést modul do hlubokého spánku, který zajistí minimální odběr a tím zamezí překročení minimálního vybití baterie. Program, který by se staral pouze o tuto funkcionalitu je znázorněn v příloze B.1. [36]

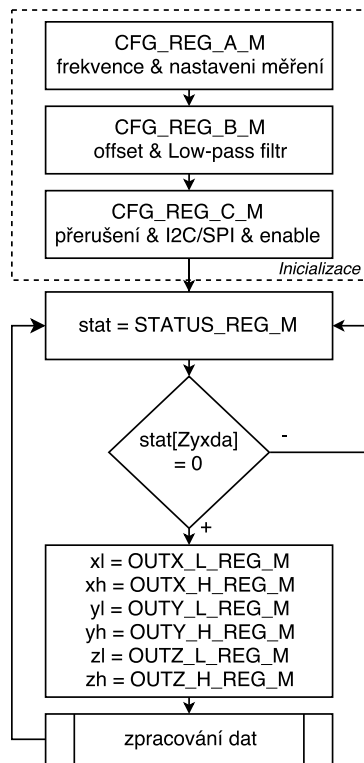
## 5.3 Inerciální jednotka

Modul *LSM303AGR* obsahující akcelerometr a magnetometr je navržen pro komunikaci po sběrnici I2C. Vyčítání a konfigurace se provádí přes osmi bitové registry. Aby bylo možné otestovat veškeré možnosti senzorů, je nutné pochopit jeho architekturu dotazů a na základě nich napsat knihovnu v programovacím jazyce *MicroPython* pro jeho ovládání. V následujících podkapitolách jsou vysvětlena základní nastavení pro jednotlivé části modulu.

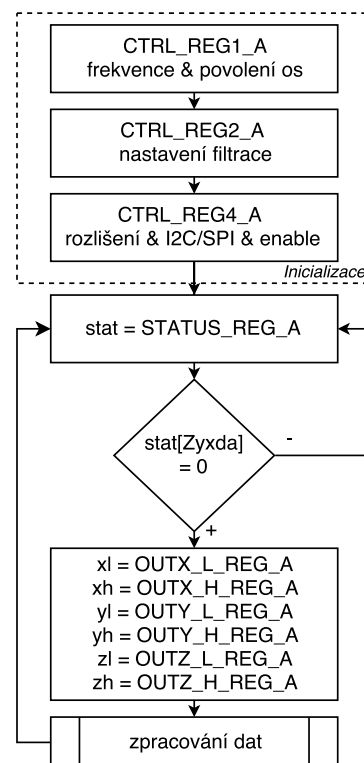
### 5.3.1 Magnetometr

Použitý magnetický senzor má dynamický rozsah  $\pm 50$  Gauss, díky čemuž dokáže rozeznat relativně vysoké magnetické pole. Aby byla vyčítaná hodnota z magnetometru v jednotkách mG, musí se vynásobit citlivostním parametrem 1,5. Ve vědeckých textech a měřeních se magnetické pole udává v jednotkách Tesla. Pro zajištění této konverze se naměřené hodnoty drží poměru  $1 \text{ mG} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ T}$ .

Magnetometr umí pracovat ve dvou výkonnostních módech (vysoké rozlišení a nízkoodběrový mód), tyto módy mají významný vliv na výstupní šum. Dále modul umožňuje filtrovat a různě zpracovávat výstupní magnetickou hodnotu jednotlivých os ( $x, y, z$ ). Další možnosti konfigurace i metoda vyčítání dat jsou znázorněny na obrázku 5.1. [52]



Obr. 5.1: Blokové schéma práce s magnetometrem



Obr. 5.2: Blokové schéma práce s akcelerometrem

### 5.3.2 Akcelerometr

Na rozdíl od magnetometru má akcelerometr v tomto obvodu větší možnosti. Umožňuje pracovat ve třech módech (vysoké rozlišení, normální a nízkoodběrový). Senzor je schopen měřit akceleraci v rozsahu  $\pm 2 \text{ g}$  až  $\pm 16 \text{ g}$ . Disponuje také FIFO (First

In, First Out) paměti pro uchování až 32 měření pro každou naměřenou složku ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Jakmile je senzor připojen k napájení, stáhne si automaticky kalibrační koeficienty z vestavěné flash paměti do pracovních registrů. Následně je akcelerometr nastaven automaticky do vypnutého stavu. Podobně jako u magnetometru 5.3.1 je ke správnému vyčítání hodnot zapotřebí akcelerometr správně inicializovat. Plnohodnotná inicializace probíhá naplněním šesti registrů. Pro pouhé vyčítání akceleračních dat je možné senzor inicializovat pouze třemi registry. Následné vyčítání se řídí předem definovanými algoritmy 5.2. Zpracování jednotlivých složek se stejně jako u magnetometru provádí skrze bitové operace. Výsledné hodnoty je nutné stejně jako u magnetometru vynásobit citlivostním parametrem zaznamenaný v technické dokumentaci.<sup>1</sup> [52]

### 5.3.3 Generace přerušení

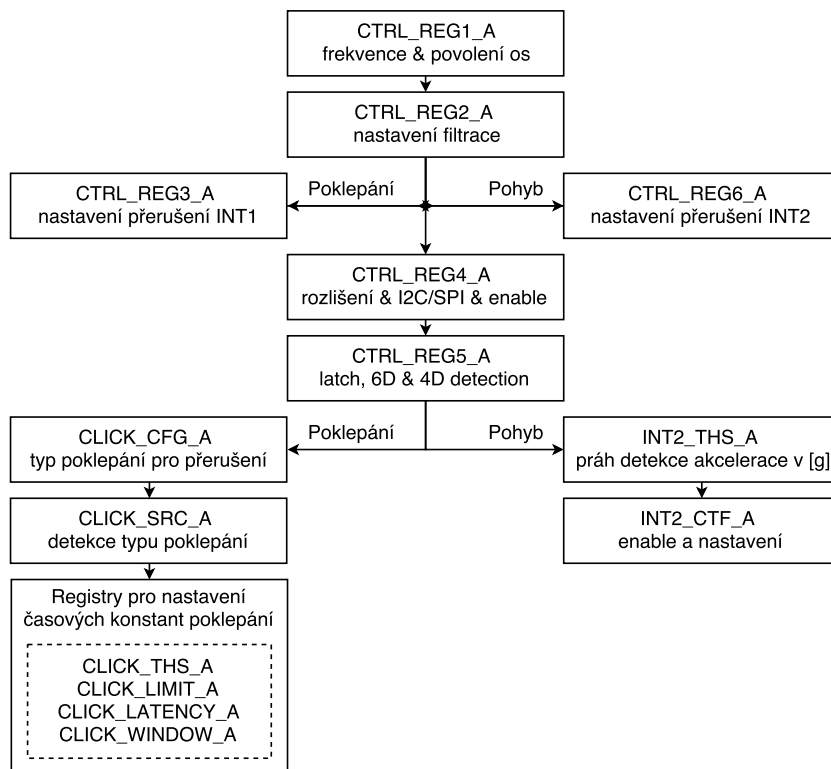
Inerciální jednotka *LSM303* umožňuje za pomoci registrů nastavit generování přerušení na dva výstupní piny. To znamená, že se přerušení vykoná v závislosti na stavech akcelerometru, či magnetometru. V našem případě se pracuje pouze s akcelerometrem. Z akcelerometrických dat je třeba detekovat jednak poklepání, ale také pohyb, který bude probouzet mikrokontrolér. Oba typy přerušení byly již v zařízení implementovány, nicméně bylo nutné je správně nastavit skrze inicializační registry samotného akcelerometru 5.3.2. Citlivost a další kritéria se definují už konkrétními přerušovacími registry. Celý proces inicializace a nastavení jednotlivých přerušení je popsán algoritmicky blokovým diagramem 5.3. [52]

## 5.4 Porovnání napájecích obvodů

Už v hardwarovém návrhu lokalizačního zařízení byla v sekci 4.2.3 diskutována možnost regulace bateriového zdroje na požadovanou hodnotu  $3,3\text{ V}$  skrze dva různé principy. V rámci ožívování zařízení tedy bylo provedeno také vyhodnocení obou regulátorů z pohledu účinnosti a následného testu předpokládaného plného výkonu lokalizátoru napájeného baterií. Výstupem z této kapitoly je doporučení pro výběr napětového regulátoru ze dvou navrhovaných typů.

---

<sup>1</sup>Hodnota jednotlivých složek ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) naměřených dat se skládá ze dvou částí (dolních 8 bitů a horních 8 bitů). Podle vstupní inicializace (little edian/big edian) je nutné oba byty spojit do jednoho 16 bitového slova. Výslednou hodnotu jednotlivých os v decimální hodnotě dostaneme po přepočtu hodnoty z dvojkového doplňku.



Obr. 5.3: Blokové schéma práce s přerušeními pro poklepání a pohyb

### 5.4.1 Vliv aktivního a sleep módu na odběr proudu

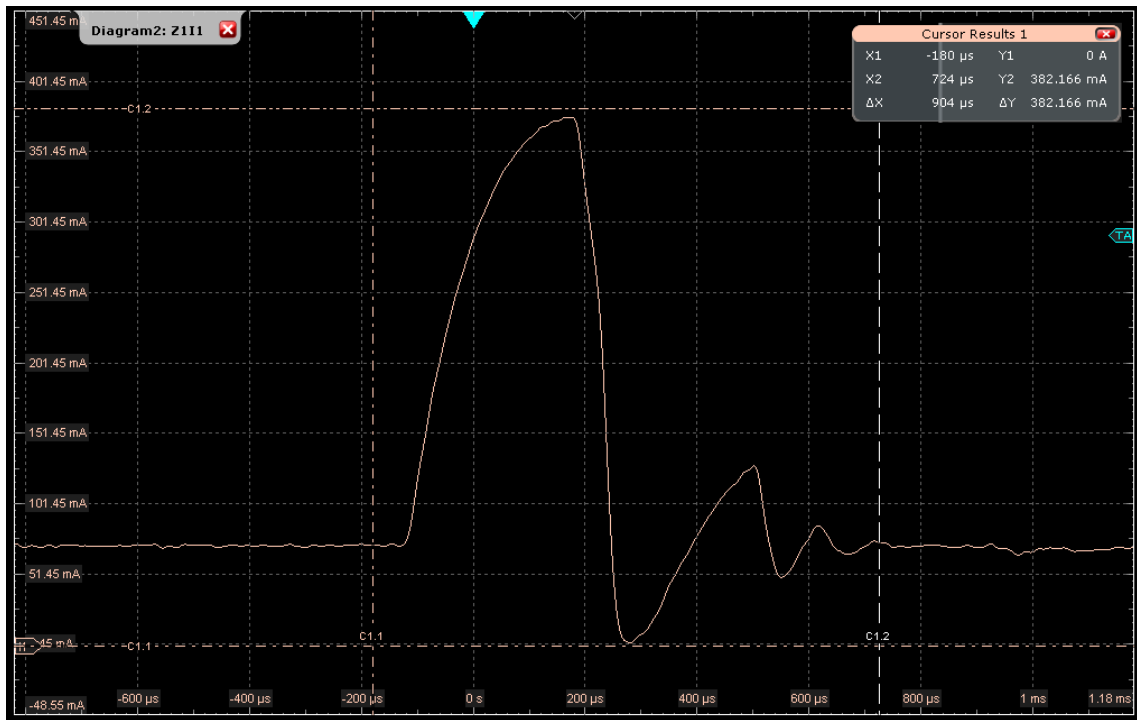
V případě, že se zařízení nebude pohybovat, je jeho předpokládaný proudový odběr díky sleep módu Wi-Fi modulu omezen převážně na klidový odběr mikrokontroléru a inerciálního modulu. Předpokládá se, že se tento proud bude pohybovat v desítkách až stovkách mikroampér. Hodnoty proudů se však budou lišit v závislosti na použitém napěťovém regulátoru. V tabulce 5.1 jsou změřené průměrné hodnoty odebíraného proudu ve sleep módu přes zařízení microCurrent [51].

Tab. 5.1: Proudový odběr v závislosti na módech a regulátorech napětí

		DC-DC	LDO
<b>Sleep mode</b>	Mikroprocesor	41 $\mu A$	53 $\mu A$
	Mikroprocesor & detekce pohybu	66 $\mu A$	68 $\mu A$
<b>Run mode</b>	Maximální výkon při získávání a odesílání dat	323,6 mA	406,6 mA

Pro takto nízké proudy (zejména pro sleep mode), ale také pro rozlišení největšího proudového odběru, který nastává při vysílání Wi-Fi dat, je lepší měřit na přístroji

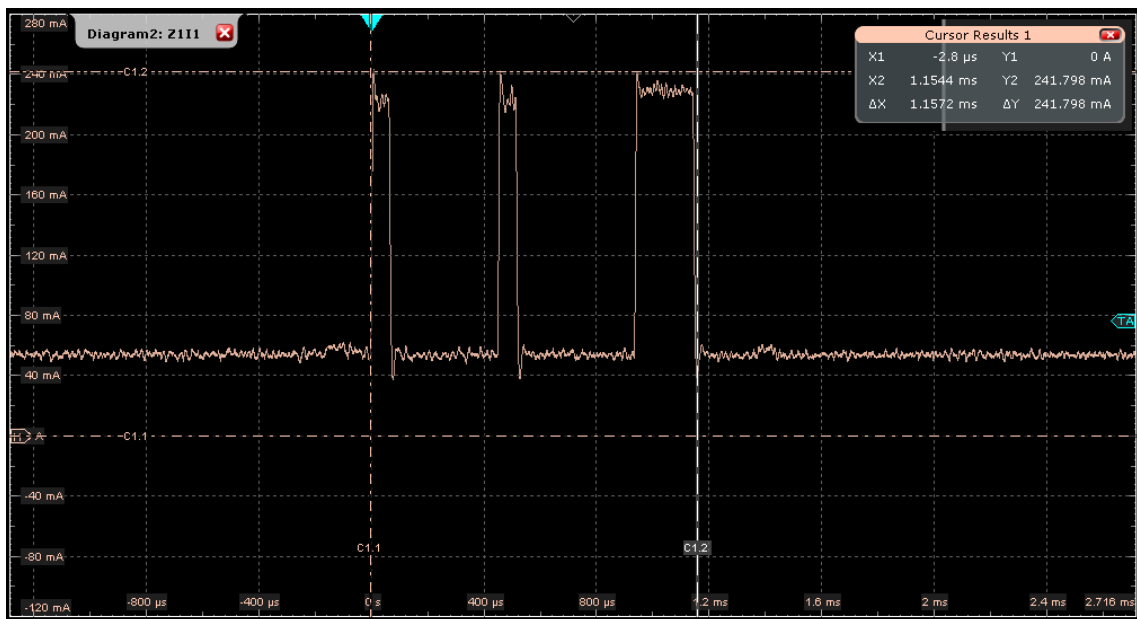
s větším rozlišením. Pro porovnání naměřených výsledků byl proto změřen vysílací i sleep mode na osciloskopu *Rohde & Schwarz RTE1000* [44] spolu s multikanálovou sondou *RT-ZVC02* (rozlišení 18 bitů) [39]. Největší rozdíly v měření byly zaregistrovány ve vysílacím módu. Na obrázku 5.4 a 5.5 jsou zobrazené snímky obrazovky osciloskopu. Rozdíl v měření s micro currentem je zřetelný, zařízení s LDO má větší odběr, ale také zdeformovanější průběh vysílání Wi-Fi. Průběh proudového odběru u sleep módu byl u zařízení s DC-DC oproti zařízení s LDO hodně zašuměný.



Obr. 5.4: Wi-Fi peak v zapojení s LDO

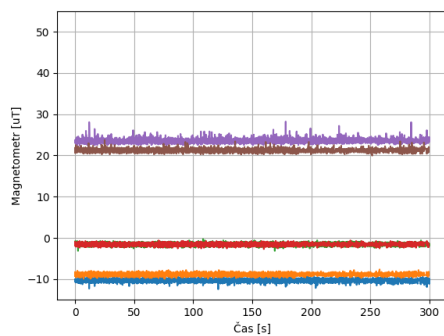
#### 5.4.2 Vliv napěťového regulátoru na magnetometr

Přestože jsou magnetická měření probrána podrobněji v kapitole 6, je vhodné pro správný výběr mezi LDO a DC-DC změřit výstupní charakteristiky magnetometru v porovnání s napájením z laboratorního zdroje. V průběhu měření bylo zařízení uchyceno do polystyrenové desky, která byla pevně spojena s podložkou. Při výměně zdroje byla zajištěna nehybnost celého přípravku. Výstupní data odpovídají nekalibrovanému magnetickému senzoru se zapnutým low-pass filtrem spolu s offset kompenzací. Nekalibrované zařízení způsobí mezi jednotlivými zařízeními rozdíly, i když bylo jejich umístění v prostoru totožné. Měření je však prováděno vzhledem k referenčním hodnotám vztaženým k laboratornímu zdroji. Výsledky měření jsou vidět na obrázku 5.6 a 5.7. Nejvíce se referenčnímu měření přibližuje zařízení s DC-DC

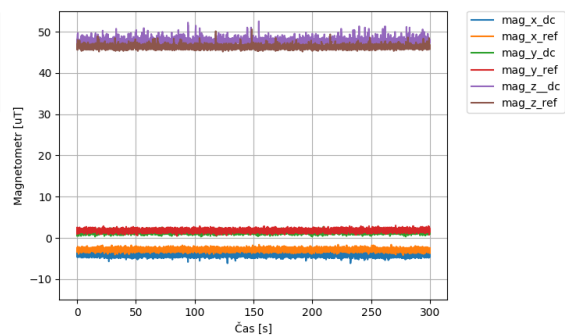


Obr. 5.5: Wi-Fi peak v zapojení s DC-DC

měníčem napětí. U zařízení s LDO bylo pozorováno zkreslení vůči referenci převážně v osách  $Z$  a  $X$ .



Obr. 5.6: Vliv LDO na magnetometr



Obr. 5.7: Vliv DC-DC na magnetometr

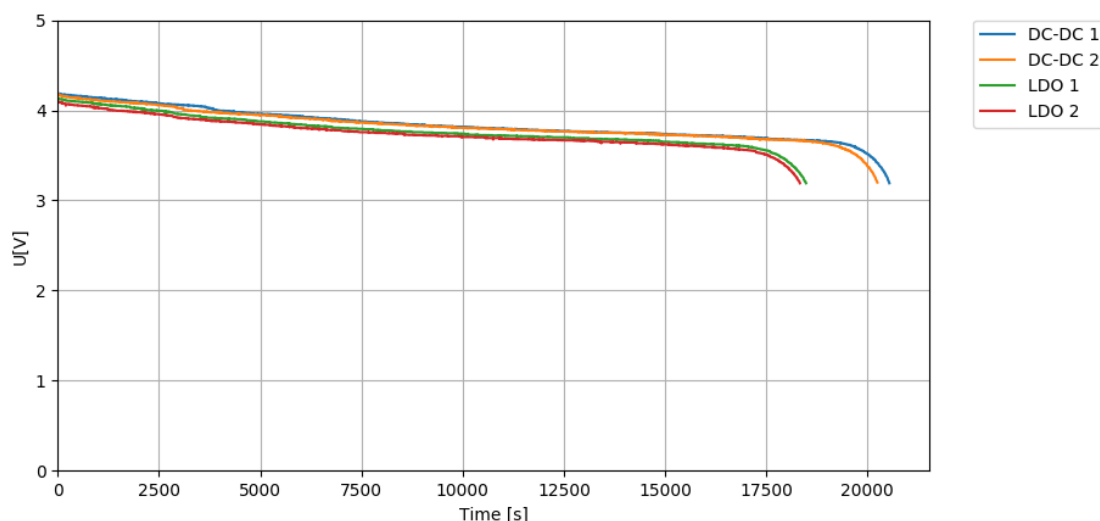
### 5.4.3 Výdrž plně pracujícího zařízení

Mezi poslední testy výběru vhodného napěťového regulátoru je test provozu. Pro test byly použity čtyři kusy zařízení (polovina s DC-DC a ostatní s LDO) s Li-Po baterií o kapacitě  $300\text{mAh}$ . Pro měření byla vybrána ta nejhorší možná situace, kdy zařízení musí měřit jak magnetická data, RSSI všech dostupných Wi-Fi sítí a stav baterie. Změřená data se odesílají na server přes Wi-Fi. Mezi jednotlivými



měřeními byla zvolena časová mezera 1 sekunda, kdy bylo zařízení uspáno a probouzeno modulem reálného času v mikroprocesoru. Ve sleep módu byla pro simulaci reálného využití spuštěna detekce pohybu akcelerometrem. Jakmile zařízení dosáhlo minimálního napětí z baterie 5.2 byl test pro konkrétní zařízení zastaven.

Výsledky měření jsou znázorněny na obrázku 5.8. Z naměřených dat vyplývá, že zařízení s DC-DC regulátorem vydrží při použití 300 mAh baterie pracovat na plný výkon průměrně 5 hodin a 40 minut. Zařízení s LDO pak v průměru 5 hodin a 6 minut, což je o 10 % méně.



Obr. 5.8: Test výdrže baterie pro DC-DC a LDO

#### 5.4.4 Vyhodnocení

V předchozích podkapitolách byly popsány měřicí metody charakterizující vlastnosti použitých napěťových regulátorů. Největší vypovídací hodnotu pro budoucí vývoj zařízení má měření zabývající se stanovením doby provozu při maximálním výkonu 5.4.3. Díky tomuto měření a měření proudu při jednotlivých módech byl jako hlavní napěťový prvek zvolen DC-DC měnič. Jeho cena sice přesahuje o 12 % náklady na zařízení s LDO, celková výdrž na baterii je však v tomto případě přednější. Díky tomu, že bude zařízení většinu času ve výrobní hale čekat na naplnění dopravníků, sníží se sleep módem spotřeba na minimum a tím prodlouží požadovaná doba provozu na více jak jednu pracovní směnu.

## 6 MAGNETICKÁ MĚŘENÍ

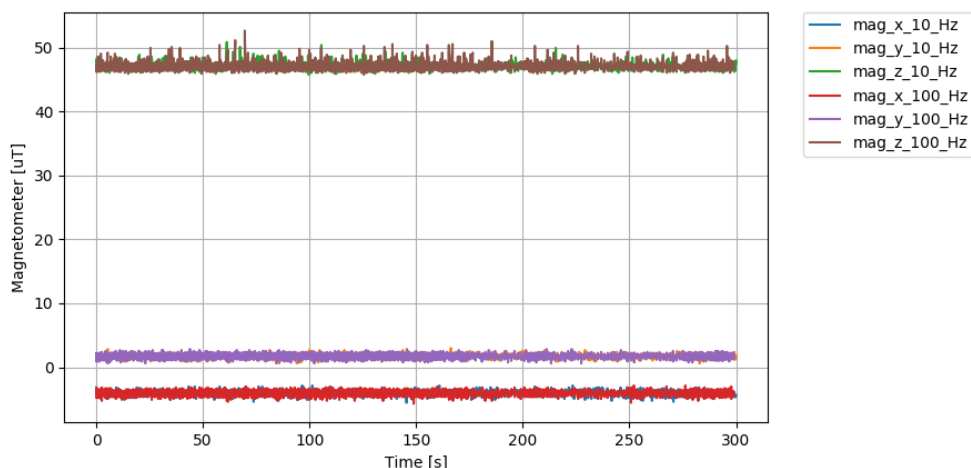
Navrhovaný lokalizační systém se neskládá pouze z Wi-Fi fingerprintingu, ale také z magnetického měření. Aby bylo možné data z magnetického senzoru použít, je nutné nejprve zjistit jak je magnetometr ovlivňován okolím, návrhem či samotným měřením. Tato kapitola se zabývá především analýzou magnetických dat a následnou kalibrací pro správné využití magnetického senzoru pro účely lokalizace.

### 6.1 Nastavení magnetického senzoru

Magnetický senzor, který je součástí inerciální jednotky *LSM303AGR*, je možné nastavit do několika módů a režimů. Výběrem módu se de facto ovlivňuje konečný proudový odběr.

Velice důležitým parametrem je výběr režimu vzorkování. Existují dva základní módy. Nejvíce používaným módem je možnost kontinuálního vyčítání dat a druhým nasnímání dat pouze na požadavek (single mode). V režimu single mode, je snížena spotřeba magnetometru na minimum, což se hodí pro funkci vlastní lokalizace. Pro mapování je však lépe využít kontinuální mód ve kterém je také lépe zpracována interní filtrační funkcionality pro potlačení offsetu. Funkce potlačení offsetu neslouží pro samotnou kalibraci, nýbrž pro eliminaci záskoků způsobených chybou senzoru. V režimu single mode je nutné offset dopočítávat na straně mikrokontroléru. Magnetometr disponuje také digitálním low-pass filtrem, který efektivně filtruje šum z naměřených dat. V magnetometru lze zapnout také teplotní kompenzaci naměřených dat, měřením bylo však dokázáno, že na výstupní data má mnohem větší vliv potlačení offsetu a low-pass filtr. Ve všech měřeních v tomto dokumentu, které připadají právě magnetometru jsou tyto filtry a kompenzace použity.

Magnetometr může pracovat na frekvenci 10, 20, 50 a 100 *Hz*. Pro potřeby mapování a správného filtrování se nabízí pracovat na vyšších kmitočtech. Na druhou stranu je při vlastní lokalizaci nutné proces optimalizovat z hlediska spotřeby energie. Kvůli této skutečnosti bylo provedeno testovací měření, které má za účel odhalit případné odchylky spodního frekvenčního limitu 10 *Hz* (bude využito pro vlastní lokalizaci), ale také horního 100 *Hz* limitu (bude využito pro zmapování plochy). Výsledek takto definovaného měření je znázorněn na obrázku 6.1. Data potvrzují předpoklad, že vzorkovací frekvence nemá žádný vliv na data měřená pro potřeby aplikace, tudíž je možné magnetické pole v režimu mapování vzorkovat s vyšší frekvencí, než v lokalizačním módu.



Obr. 6.1: Vliv vzorkovací frekvence na magnetometr

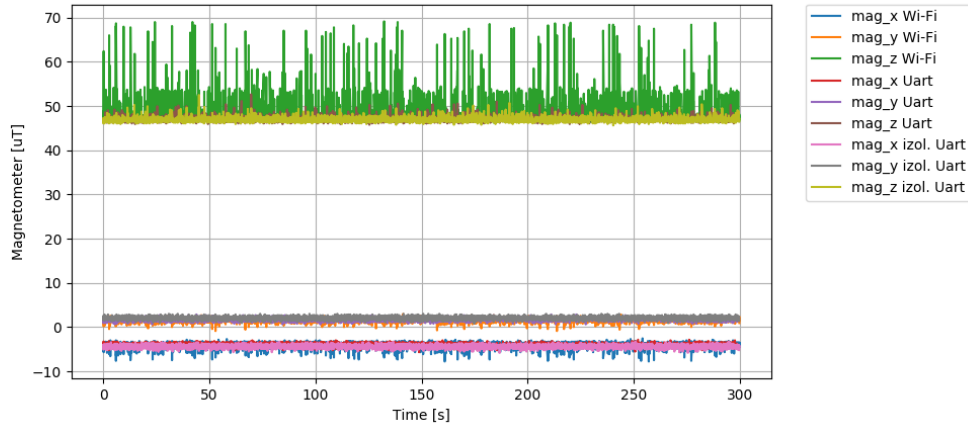
## 6.2 Měření přesnosti magnetometru

Výstup z magnetického senzoru se ne vždy chová dle předpokladů. Proto je nutné otestovat veškeré komunikace snímání dat v závislosti na technice měření a okolních vlivech. Mezi takovéto konfigurace může patřit vliv komunikace po UART rozhraní, či stálost vektoru magnetického pole při otáčení senzoru kolem své osy.

### 6.2.1 Vliv UART komunikace

Pro jednodušší komunikaci při mapování bylo zamýšleno použít komunikaci s řídicím systémem po UART rozhraní. Při vlastní lokalizaci se však lokalizační data budou posílat do databáze skrze Wi-Fi přenos. Obě metody mohou ovlivňovat magnetické měření. Například zvýšením úrovně elektromagnetického šumu na napájení, či zemní části plošného spoje. Bylo proto provedeno srovnání vlivu obou komunikačních metod na naměřené údaje. Vlastní zařízení bylo při testu upevněno do polystyrenového profilu, který byl nehybně spojen s podložkou. Byly otestovány tři případy posílání dat. Nejdříve byla naměřená data odesílána přes Wi-Fi, poté přes UART a nakonec přes izolovaný UART aby se otestoval vliv zemních smyček v UART komunikaci. Výsledky jsou vidět na obrázku 6.2. Průměrná hodnota rozdílu jednotlivých měřících metod nepřesáhla  $1 \mu T$ . Pro kontrolu byla také vypočítána průměrná hodnota směrodatných odchylek, které udávají nakolik se od sebe jednotlivé vzorky liší. Pro osu  $x$  měla směrodatná odchylka hodnotu  $0,32 \mu T$ , pro  $y$   $0,3 \mu T$  a pro  $z$   $0,71 \mu T$ . Jediný velký rozdíl odchylek byl zaznamenán v ose  $z$ , kde bylo měření komunikace s Wi-Fi poznamenáno velkým šumem, který byl nejspíše způsoben manipulací se zařízením mezi měřeními. Z předchozích závěrů vyplývá, že komunikace přes UART

nemá téměř žádný vliv na vyčítání magnetických dat ze senzoru.



Obr. 6.2: Vliv UART rozhraní na magnetická měření

### 6.2.2 Vliv natočení magnetometru vůči magnetickému severu

Při rotaci magnetometru kolem osy v jednom bodě prostoru se předpokládá, že absolutní velikost vektoru intezity magnetického pole země bude **konstantní**. Velikost vektoru intenzit magnetického pole  $|\mathbf{B}|$  se vypočítá podle rovnice 6.1, kde  $B_x$ ,  $B_y$  a  $B_z$  znázorňují jednotlivé složky vektoru ve všech třech osách.

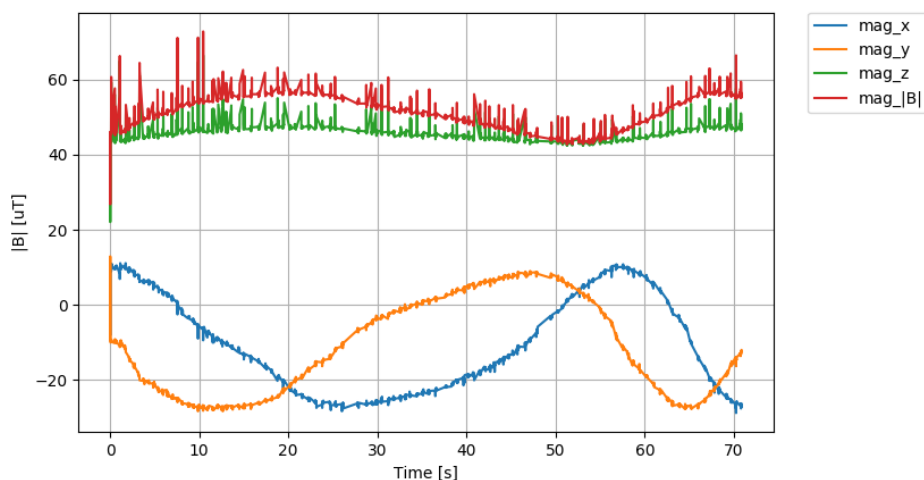
$$|\mathbf{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (6.1)$$

Pro ověření skutečnosti byl lokalizační tag umístěn na rotující podložku tak, aby ležel magnetickým senzorem ve středu osy rotující podložky. Tím by měl být eliminován vliv osy  $z$ , kolem které se bude magnetometr otáčet. Předpokládá se tedy, že bude v průběhu času osa  $z$  konstantní a osy  $x$  a  $y$  budou tvořit navzájem fázově posunutou sinusoidu. Samotný test probíhal rotací podložky v jednom směru a konstantním časovém intervalu. Zařízení po dobu měření odesílalo magnetická data skrze Wi-Fi na serverovou databázi.

Výsledek testovacího měření je znázorněn na obrázku 6.3. Z naměřených hodnot se potvrdila téměř konstantní hodnota osy  $z$  v čase. Její minimální amplituda oscilace je způsobena nedokonalým vystředěním magnetometru vůči rotující podložce.

Ostatní naměřené hodnoty se však zcela neztotožňují s předpoklady definovanými v počátku měření. Osy  $x$  a  $y$  připomínají sinusoidu jen lehce a velikost vektoru intezity magnetického pole  $|\mathbf{B}|$  kmitá ve velké amplitudě místo toho, aby byla konstantní. Důvodem těchto chyb jsou objekty v blízkosti senzoru a okolní magnetický

šum. Aby mohla být data magnetického senzoru využita, je nutné využít kalibračních metod, díky kterým bude možné naměřená data matematicky korigovat. Kalibrací magnetometru se zabývá následující kapitola 6.3.



Obr. 6.3: Rotace magnetometru kolem osy z

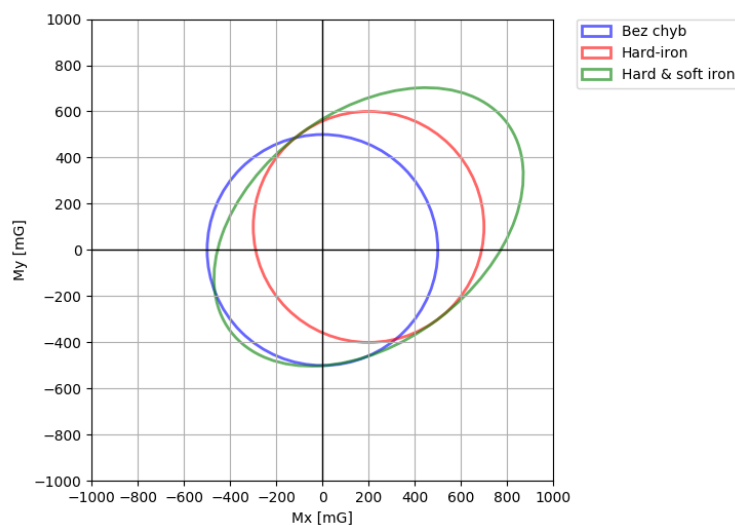
## 6.3 Kalibrace

Jak bylo potvrzeno v předchozích měřeních 6.2.2, magnetická data naměřená magnetometrem jsou postižena chybou, která je způsobena okolními vlivy. Tyto chyby jsou klasifikovány podle toho, jakým způsobem námi měřené magnetické pole ovlivňují. Chyby ovlivňující magnetická měření jsou zjistitelné rotací magnetometru kolem osy  $z$  alespoň o  $360^\circ$ . Následným vynesemím naměřených dat podle jednotlivých složek magnetického pole do  $xy$  grafu v ideálním případě znázorní kružnici. Ve skutečnosti však pozorujeme deformace kružnic dvěma typy chyb, které jsou popsány v následujících odstavcích. [31] [61]

**Chyba hard-iron** je ovlivnění magnetického snímače objektem, který vytváří své vlastní magnetické pole. V praxi může být tato chyba způsobena například keramickými magnety nebo kouskem zmagnetizované oceli v okolí senzoru. Pokud je takovýto magnetický objekt v blízkosti senzoru, způsobí permanentní posunutí celé charakteristiky. [31]

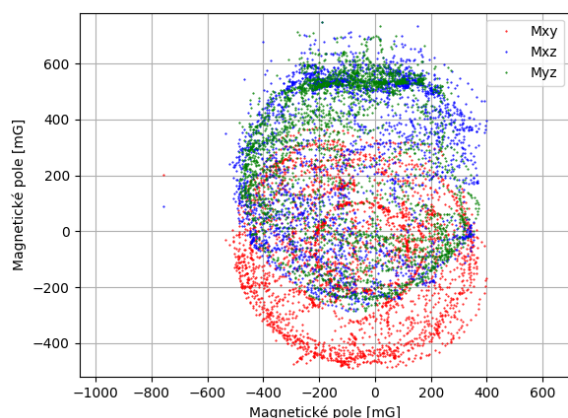
**Chyba soft-iron** vzniká ovlivněním existujícího magnetického pole okolními objekty. Tento jev ovlivňuje magnetické pole v závislosti na úhlu a směru vektoru intenzity magnetického pole vzhledem k magnetickému senzoru. Nejčastějším důvodem tohoto jevu je zejména vliv niklu a jiných kovů obsažených v okolních součástkách. [31]

Grafický model obou vlivů na ideální měření magnetické pole je znázorněn na obrázku 6.4, kde je barevně zvýrazněno magnetické pole bez dříve zmiňovaných vlivů (modře) a následně hard-iron (červeně) a společný vliv hard + soft (zeleně).

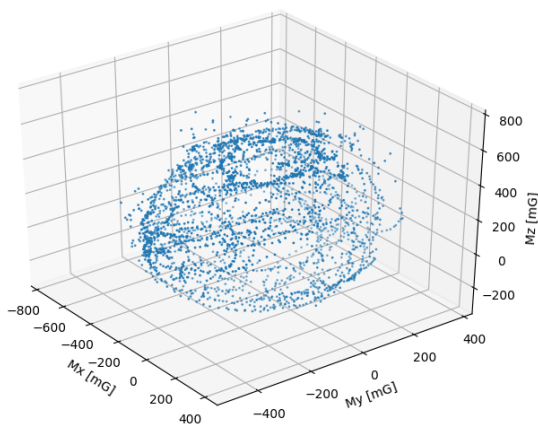


Obr. 6.4: Vlivy na magnetické měření [31]

Pro eliminaci těchto chyb se dá využít několik matematických přístupů. V následujících dvou sekcích jsou znázorněny vybrané principy eliminace hard-iron i soft-iron vlivů. Oba přístupy jsou znázorněny na reálných datech. Kalibrační data byla snímána rotací magnetometru kolem každé své osy. Reálně se rotace ve všech osách docílí pomalým pohybem zařízení kopírujícím ležící osmičku.



Obr. 6.5: Nekalibrovaná magnetická data ve 2D



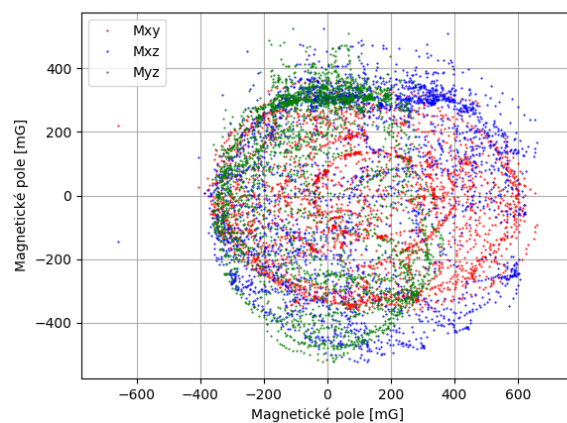
Obr. 6.6: Nekalibrovaná magnetická data ve 3D

Naměřená data pro kalibraci zařízení jsou znázorněna na obrázku 6.5, kde je jasně vidět posunutí jednotlivých os od předpokládané nuly (hard-iron). Soft-iron chyba na tomto obrázku není až tak zřetelná, nicméně při pohledu na 3D vizualizaci naměřených dat 6.6, je vidět jejich elipsovitě protažení. Výstupem z kalibračních funkcí jsou konstanty, skrz které je možné dopočítat zkalibrované hodnoty magnetometru přes maticovou rovnici 6.2, kde prvky  $M_x$ ,  $M_y$  a  $M_z$  znázorňují naměřené magnetické hodnoty. Prvky  $B_x$ ,  $B_y$  a  $B_z$  udávají hard-iron kompenzaci pro posunutí dat a nakonec prvky  $M_{11}$  až  $M_{33}$  znázorňují transformační matici eliminující soft-iron chybu. Výsledkem rovnice jsou zkalibrovaná magnetická data. [31]

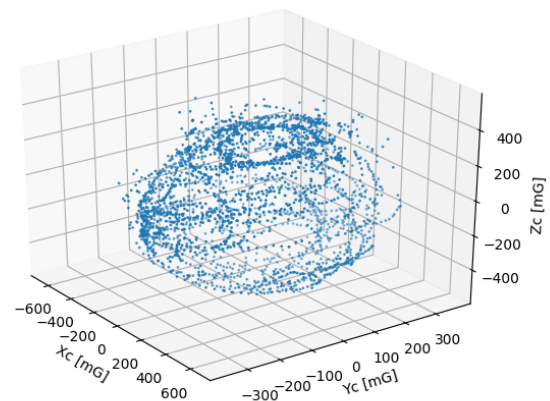
$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \times \left( \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \right) \quad (6.2)$$

### 6.3.1 Metoda maxim a minim

Tato metoda patří k těm nejjednodušším a zabývá se převážně korekcí hard-iron chyby. Funguje na principu zaznamenávání maxim a minim v průběhu kalibrační procedury (pohyb kopírující ležatou osmičku) ve všech šesti směrech  $\pm M_x$ ,  $\pm M_y$ ,  $\pm M_z$ . Jakmile je zaznamenán dostatečný počet maxim a minim pro každý směr, vypočítá se jejich průměrná hodnota, která umožní vycentrování jednotlivých magnetických složek. Dalším přístupem maximálních a minimálních hodnot je také potlačení soft-iron chyb (změna měřítka). Tato metoda se však odlišuje od výpočtu komplexní transformační matice, jak je definována ve vzorci 6.2. [47]



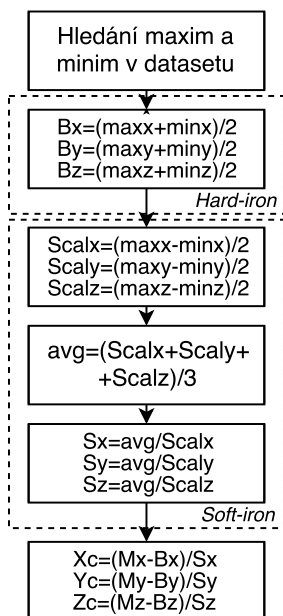
Obr. 6.7: Kalibrace metodou maxim a minim - 2D vizualizace



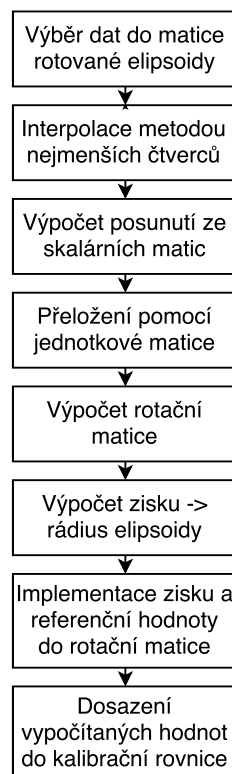
Obr. 6.8: Kalibrace metodou maxim a minim - 3D vizualizace

Maximální a minimální hodnoty se zde využijí k vyrovnání hodnot jednotlivých měřených os. Měřítka se zde vypočítá jako poměr průměru rozdílů maximální k

minimální hodnotě. Algoritmus potlačení hard-iron a soft-iron za pomoci maxim a minim je znázorněn na obrázku 6.9. Data zkalibrovaná touto metodou jsou graficky znázorněna na obrázcích 6.7 a 6.8. [47]



Obr. 6.9: Algoritmus kalibrace metodou maxim a minim



Obr. 6.10: Algoritmus kalibrace metodou interpolace elipsy

### 6.3.2 Metoda interpolace elipsy

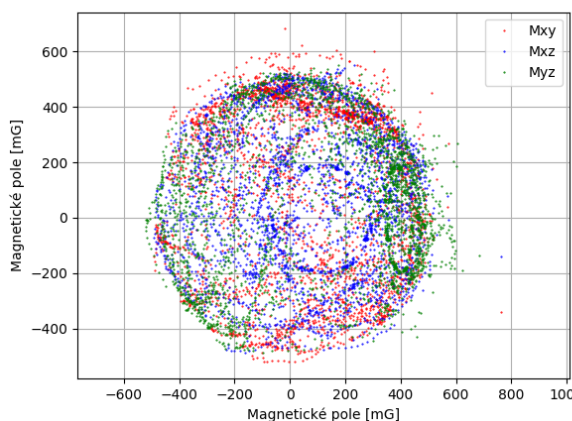
Dalším přístupem pro kalibraci magnetometru je využít metody interpolující naměřená data na elipsu. Výstupem takto postavené kalibrační funkce jsou potřebné parametry pro zmíněnou rovnici 6.2. Rotační matice se v tomto případě skládá ze dvou částí. Rotační matice se v tomto algoritmu totiž následně upravuje podílem své diagonály s ziskem násobeným referenční hodnotou průměru zisku. Algoritmus výpočtu kalibračních konstant je znázorněn v blokovém diagramu 6.10. [12]

Kalibrační data použitá pro demonstraci této metody jsou stejně jako v předchozím případě znázorněna graficky na obrázcích 6.11 a 6.12.

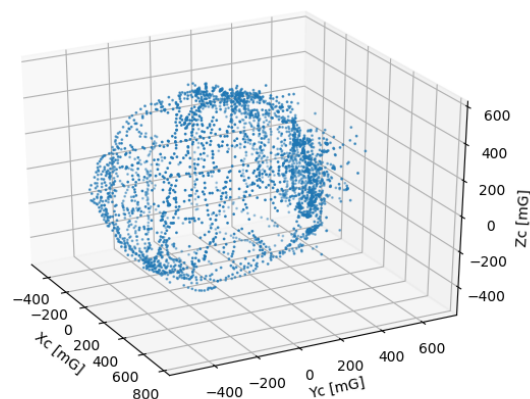
### 6.3.3 Výběr kalibrační metody

Byly demonstrovány dvě vybrané metody pro kalibraci magnetických dat. Na obou výsledcích je zřejmé znatelné zlepšení oproti datům bez kalibrace. Metoda kali-





Obr. 6.11: Kalibrace metodou nejmenších čtverců - 2D vizualizace



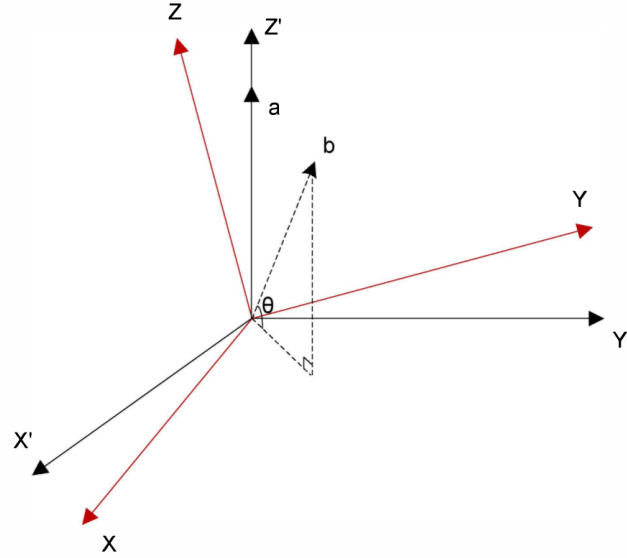
Obr. 6.12: Kalibrace metodou nejmenších čtverců - 3D vizualizace

brance za pomoci maxim a minim 6.3.1 má oproti metodě interpolace dat elipsy 6.3.2 několikanásobně jednodušší algoritmus. Při porovnání obou kalibračních metod s přihlédnutím ke grafickému znázornění magnetického pole bez chyb 6.4, je vidět velmi dobrý výsledek u matematicky náročnější metody interpolace elipsy. Zejména kvůli přesnosti magnetických dat pro účely lokalizačního systému, byla pro kalibraci vybrána metoda interpolace elipsy.

## 6.4 Pochopení magnetických dat

Magnetický senzor produkuje data, která se musí zkalibrovat 6.3. Ve skutečnosti však tato kalibrace nestačí pro určení veškerých složek magnetického pole. Magnetická data z magnetometru udávají magnetický sever (vztažen k geomagnetickému pólu), který je rozdílný od takzvaného pravého severu (vztažen k zemské ose rotace). Magnetické pole Země je popisováno deklinací ( $D$ ), která popisuje úhlovou vzdálenost od rovníku, inklinací ( $I$ ) což je úhel magnetického pole vzhledem k vodorovné rovině, horizontální složku magnetického pole ( $H$ ), vertikální složku ( $Z$ ), sever ( $X$ ), východ ( $Y$ ) a celkovou magnetickou intenzitou. Rozdíl magnetického severu a pravého severu je popsán právě úhlem deklinace. Inklinace naopak určuje úhel mezi horizontálním a celkovým magnetickým vektorem.

Jako zdroj lokalizačních dat nemohou být magnetické složky  $x$ ,  $y$  a  $z$  použity bez toho, aniž by byl znám pravý sever, nebo magnetický sever, respektive stejná pozice magnetometru v mapovací a online fázi. Pro určení jednotlivých složek v závislosti na poloze magnetometru a tím zvětšení počtu proměnných do učících algoritmů lokalizačního systému se využívá akcelerometr. Díky vlastnostem akcelerometru je totiž možné měřit gravitační složku, díky které je možné odvodit vertikální natočení



Obr. 6.13: Využití gravitace pro určení vertikální a horizontální složky magnetického pole [66]

zařízení. Protože jsou oba senzory (akcelerometr a magnetometr) umístěny v jednom pouzdře se stejně orientovaným souřadným systémem, je možné z magnetického pole udávaného magnetometrem určit vertikální a horizontální magnetickou složku. Pro správný přepočet je nutné akcelerometr zkalibrovat za pomoci diskutovaných kalibračních postupů 6.3. Celý princip je znázorněn na obrázku 6.13, kde je červeně vyznačen souřadný systém senzoru a černě souřadný systém Země. Parametr  $a$  znázorňuje opačný směr gravitace a  $b$  určuje intenzitu magnetického pole. [66]

Pro výpočet obou diskutovaných složek je nutné z dat akcelerometru a magnetometru dopočítat inklinaci  $\theta$  podle vzorce 6.3, kde složky  $a$  označující zkalibrovaný akcelerometr a  $b$  zkalibrovaný magnetometr. [66]

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arccos \left( \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} \right) \quad (6.3)$$

Vertikální ( $\mathbf{B}_v$ ) a horizontální ( $\mathbf{B}_h$ ) složky se následně dopočítají přes vzorce 6.4 a 6.5

$$\mathbf{B}_v = |\mathbf{B}| \cdot \sin(\theta) \quad (6.4)$$

$$\mathbf{B}_h = |\mathbf{B}| \cdot \cos(\theta) \quad (6.5)$$

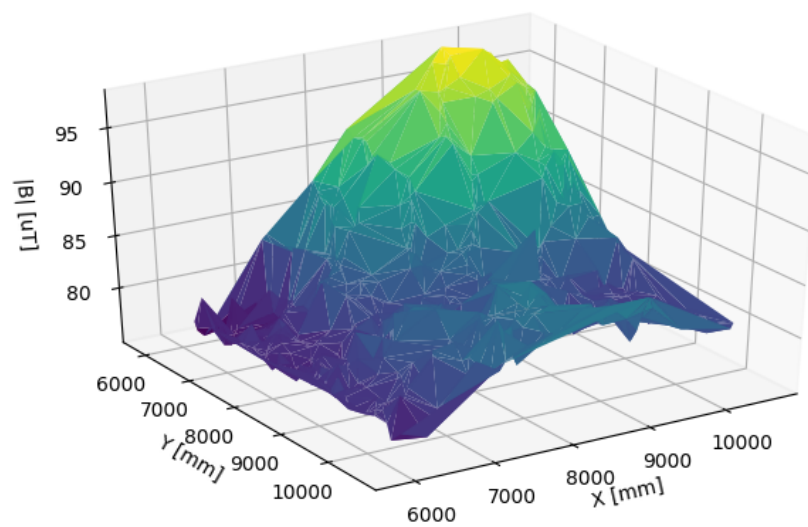
Po následujících matematických úpravách je možné využít tyto dvě vstupní hodnoty do klasifikačního algoritmu.

## 6.5 Testovací měření magnetického pole

Pro správné pochopení stálosti a proměnlivosti hodnot magnetického pole v prostoru způsobené anomáliemi budovy je vhodné provést měření v předem definovaném prostoru a tím otestovat potenciál využití magnetického měření jako součásti lokalizačního systému.

Pro lepší automatizaci všech nadcházejících měření je nutné využít referenční systém, ke kterému se bude získaná poloha či jiná data přiřazovat. K tomuto účelu byl využit lokalizační UWB kit *Pozyx* obsahující čtyři vysílací jednotky (kotvy) a jeden lokalizátor [42]. Tento systém dosahuje přesnosti deseti centimetrů a díky otevřenému programovacímu rozhraní umožňuje snadnou integraci do měřicího systému.

Pro testovací měření magnetických anomálií byla použita stejná čtvercová síť, jaká jako pro monitoring RSSI Wi-Fi signálů v sekci 3.2. Pro snímání magnetického pole byl použit jeden z několika osazených lokalizačních tagů, který byl připojen přes UART rozhraní k počítači. Jediným úkolem programu v zařízení bylo neustále odesílat jednotlivé naměřené hodnoty složek z magnetometru. Počítač připojený k zařízení se staral o příjem dat a následné spárování s lokálními údaji ze frameworku *Pozyx*. Takto spravovaná data se následně odesílala do měřicí databáze [50]. Z databáze byla data načtena, zkalibrována a graficky znázorněna do obrázku 6.14. Na obrázku jde vidět proměnlivost anomálií v prostoru. Měření bylo prováděno opakovaně v různých časech. Výsledky se mezi sebou shodovaly, což značí časovou stálost naměřených magnetických anomálií. Předpokládá se, že při změření větší plochy budou mít naměřené anomálie tendenci se opakovat díky konstrukčním vlastnostem budovy.

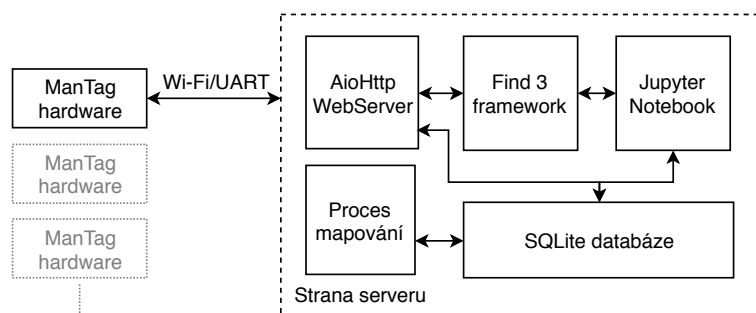


Obr. 6.14: Znázornění velikosti vektoru intezity magnetického pole v testovaném prostoru

## 7 ARCHITEKTURA A NÁVRH SYSTÉMU

Hlavním cílem kapitoly je algoritmicky a následně programově navrhnout lokalizační systém, který bude postaven na již demonstrovaných vlastnostech Wi-Fi fingerprintingu a magnetického měření, probraných v předchozích kapitolách. Jako hlavní programovací jazyk byl z důvodu efektivity a flexibility zvolen *Python 3*.

Navrhovaný lokalizační systém lze blokově rozdělit podle obrázku 7.1. Základní dělení se skládá ze serverové části, na které bude spuštěn webový server založený na *Python* knihovně *AioHttp* [5], komunikující s *SQLite* databází [50]. Ten bude komunikovat s lokalizačním frameworkem *Find 3* [18], který se stará o klasifikaci a rozhodovací správu jednotlivých požadavků na lokalizaci. Posledním blokem serverové části je serverový editor *Jupyter Notebook* [25] určený pro jednoduchou a efektivní správu databáze a vizualizaci dat při testování a odlaďování systému. Druhou částí je samotná lokalizační jednotka s podporou *MicroPythonu* [34]. Důkladnější popis dílčích částí je rozšířen v následujících podkapitolách.

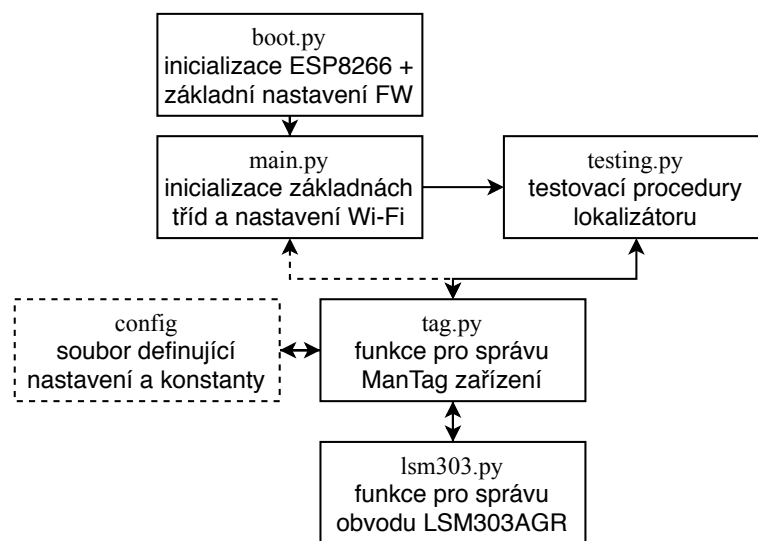


Obr. 7.1: Architektura lokalizačního systému

### 7.1 Firmware lokalizační jednotky

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5, je hlavním programovacím jazykem mikrokontroléru *MicroPython*. Celá struktura firmwaru se tedy skládá z funkcí a tříd napsaných právě tímto programovacím jazykem. Blokově jsou jednotlivé třídy popsány na obrázku 7.2. Hlavními soubory implementace jsou `boot.py` a `main.py`, které se volají po každém spuštění. Vytvořené programové vybavení je tedy nutné inicializovat právě v souboru `main.py`. Reálně se pro veškeré testování inicializuje soubor `testing.py`, který obsahuje veškeré funkcionality využité při vývoji lokalizačního tagu. Testovací třída nejprve inicializuje samotné funkcionality zařízení, které provádí skrze třídu `Tag`. Uvnitř této třídy jsou základní funkce pro ovládání lokalizační jednotky (tagu).

Patří mezi ně například načtení konfiguračního souboru, zjištění stavu baterie, obsluha Wi-Fi a inicializace inerciální jednotky *LSM303*. Nastavení a zprostředkovávání dat z tohoto senzoru umožňuje inicializovaná třída *LSM303*.



Obr. 7.2: Blokové schéma architektury firmwaru

Příklad využití takovéto architektury je znázorněno na následujícím výpisu testovacího souboru `main.py` 7.1. Hlavním úkolem celého programu je inicializace testovacích procedur, vypsání stavu baterie, výsledku Wi-Fi skenu, magnetometru, akcelerometru a spuštění testovací procedury pro mapování s UART komunikací.

Výpis 7.1: Ukázka možného formátu `main.py`

```

1 from testing import Testing
2 # inicializace testovaci tridy
3 t = Testing()
4 # ziskani stavu baterie
5 print(t.tag.getBattery())
6 # sken Wi-Fi
7 print(t.tag.getWifi())
8 # inicializace akcelerometru a magnetometru a ziskani dat
9 t.tag.lsm303.accel_init()
10 t.tag.lsm303.mag_init()
11 print(t.tag.lsm303.accel_read())
12 print(t.tag.lsm303.mag_read())
13 # spusteni nekonecne smycky pro mapovani
14 t.cube_mapping()

```

### 7.1.1 Minifikace

Wi-Fi modul *ESP-WROOM-02* disponuje omezenou programovou i operační pamětí, která je navíc z velké části alokována samotným frameworkem *MicroPythonu*. Proto je připraven oficiální *MicroPython* kompilátor [35], který provede kompresi zdrojového kódu - minifikaci. Výstupem zkompilovaného *MicroPython* souboru `.py` je nový soubor `.mpy`. Práce s takto upraveným souborem se v samotném mikrokontroléru neliší od práce s běžným `.py` souborem.

## 7.2 Serverová část

Jak bylo znázorněno na obrázku 7.1, serverová část lokalizačního systému se skládá ze čtyřech základních bloků, které jsou mezi sebou schopny komunikovat. V následujících podkapitolách jsou jednotlivé bloky popsány podrobněji.

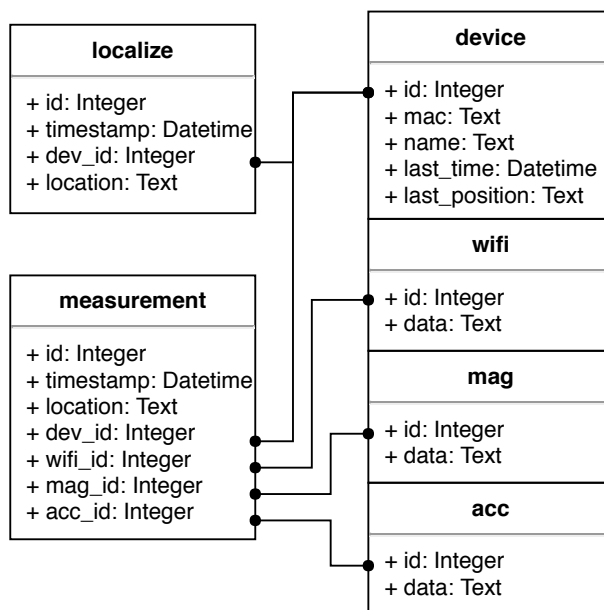
### 7.2.1 AioHttp webový server

Webový server byl naprogramován tak, aby byl schopen vykonávat systémové požadavky lokalizačního systému. Při spuštění *AioHttp* serveru jsou přijímány příchozí HTTP (Hypertext Transfer Protocol) požadavky v síti směřující na adresu serveru, na které reaguje podle API (Application Programming Interface), které bylo navrženo a zdokumentováno pomocí online služby *Apiary* [32]. Hlavním programovacím jazykem pro webový server byl stejně jako u ostatních bloků zvolen *Python 3*. Webový server komunikuje s lokální SQLite databází popsanou v podkapitole 7.2.2 a pomocí HTTP požadavků také s lokalizačním frameworkem *Find 3* (viz podkapitola 7.2.4).

### 7.2.2 SQLite databáze

Jak již z názvu podkapitoly vyplývá, byla jako hlavní databázová služba vybrána SQL databáze v podobě knihovny *SQLite*. [50] Tato relační databáze funguje na principu ukládání dat do databázového souboru. V navrhovaném lokalizačním systému veškerou komunikaci s touto databází zajišťuje třída `Database`, která je obsahem souboru `models.py`. Databázová struktura je znázorněna na obrázku 7.3. Skládá se z šesti tabulek, které jsou mezi sebou propojené jednotlivými klíči ID. Databáze je rozdělena na základní dvě tabulky. Tabulka *Localize* je určena pro online část lokalizačního systému, tudíž zde budou ukládány lokalizační data jednotlivých zařízení v čase. Tabulka `measurement` je určena pro ukládání učicích dat vztaženým k nějakému referenčnímu systému. Další čtyři tabulky (`device`, `wifi`, `mag` a `acc`)

jsou určeny pro identifikaci lokalizačních jednotek s jednotlivými vzorky RSSI, magnetického pole a dat z akcelerometru.



Obr. 7.3: Struktura SQL databáze

### 7.2.3 Proces mapování

Pro testovací účely byla vytvořena skupina tříd a funkcí pro mapování prostoru, ale také kalibrace a vyhodnocování. Pythonovské funkce komunikují s referenčním systémem *Pozyx* a mapovacími lokalizačními zařízeními přes UART rozhraní. Zpracovávaná data jednotlivých tagů spolu se souřadnicemi referenčního systému jsou přímo ukládána do databázové struktury 7.2.2. Celý systém testovacího mapování spolu s výsledky lokalizace je součástí kapitoly 8.

### 7.2.4 Find 3 framework

Pro vyhodnocení pozičních dat zpracovávaným strojovým učením byl vybrán aktivně vyvíjený open source framework pro lokalizaci uvnitř budov *Find 3* [18]. *Find 3* funguje na principu serveru s webovým API [3]. Framework je napsán v programovacím jazyce *Go* [20] a pro ukládání svých dat používá vlastní databázi. Pro určení lokace se používá Python knihovna *Scikit learn* [46]. Základem je deset klasifikátorů (například *Nearest Neighbors*, *Decision Tree*, *Random Forest* a další), které jsou využívány paralelně a jejich výsledky o dotazované pozici jsou sdružovány ve výsledném rozhodnutí.



### 7.2.5 Jupyter Notebook

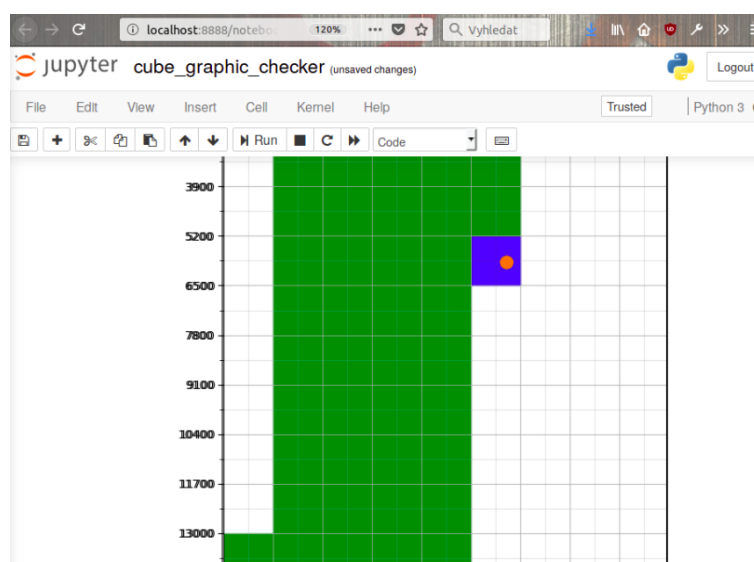
Posledním blokem znázorněným v přehledu serverové části je server *Jupyter Notebook* [25]. Jedná se o webové rozhraní jazyka *Python* s možností dělení a vykonávání psaného zdrojového kódu do jednotlivých buněk a možností vizualizace. Buňky je možné současně dokumentovat pomocí značkovacího jazyka *Markdown* [33], díky čemuž je výsledný výpis přehlednější. V rámci projektu byl *Jupyter Notebook* použit pro rychlou a efektivní analýzu nasnímaných dat z databáze a logů.

## 8 TESTOVÁNÍ LOKALIZAČNÍHO SYSTÉMU

Pro testování lokalizačního systému v prostorách společnosti Alps Electric bylo využito volného prostoru o rozměrech  $11,3 \times 23,5 \text{ m}$  pro test mapování a následnou lokalizaci. Jako referenční systém zde byl stejně jako u ostatních testů využit lokalizátor *Pozyx*. Testování bylo rozděleno na základní dvě části, které jsou probrány v následujících podkapitolách.

### 8.1 Mapování (offline část)

Pro účely mapování bylo využito pěti lokalizačních jednotek, které byly umístěny na polystyrenovou kostku o rozměrech  $28 \times 28 \times 23 \text{ cm}$ . Umístění na polystyrenu je vhodné zejména proto, že má z hlediska šíření rádiových signálů v pásmu  $2,4 \text{ GHz}$  podobné vlastnosti jako vzduch. Wi-Fi signál by tedy neměl být nijak ovlivňován. Rozměry byly vybrány tak, aby mezi lokalizátory byla mezera alespoň jedna polovina vlnové délky na frekvenci  $2,4 \text{ GHz}$ . Jednotlivé jednotky byly na kostku umístěny tak, aby byla každá jinak natočená, což umožní zahrnout odražené vlny spolu s chybou měření magnetického pole při různých natočeních magnetických senzorů do učící databáze systému. Každé zařízení bylo připojeno do USB rozcestníku přes UART rozhraní. Aby byla zajištěna co nejdelší podporovaná doba vzorkování, byly všechny tagy napájeny přes externí bateriový zdroj. Do mapovací kostky byl implementován lokalizační systém *Pozyx*, který zajišťoval referenční měření polohy. Výsledná podoba lokalizačního zařízení je uvedena jako příloha C.1 a C.2.



Obr. 8.1: Ukázka programu pro monitoring mapování

Takto upravené lokalizační zařízení bylo následně připojeno k počítači, na kterém byla spuštěna serverová část diskutovaná v kapitole 7.2. Celou mapovací logiku zajišťoval program `mapping_cube/run.py`. Mapování probíhalo tak, že byla měřená plocha (11,6 x 23,5 metrů) rozdělena na virtuální čtverce o stejné velikosti jako v předchozích testech (1,3 x 1,3 metru). Za pomoci programu spuštěném v *Jupyter Notebooku* byla sledována reálná poloha vzorkovacího vozíku v prostoru. V každém virtuálním čtverci bylo měřeno 15 vzorků Wi-Fi RSSI na jedno zařízení. Na každý vzorek RSSI připadalo dalších 20 vzorků z magnetického senzoru. Reálně tedy na každý snímaný čtverec dohromady připadalo okolo 1500 hodnot měření magnetického pole a 75 vzorků intenzit signálu Wi-Fi. Mapovací proces bylo možné sledovat na již zmiňovaném programu dostupném přes webové rozhraní, které je znázorněno na obrázku 8.1 (zelené políčka znázorňují zmapovaný prostor a modré aktuální mapovací pozici). Data ze zařízení byla ukládána do separátní databáze.

Takto nashromážděná data byla následně zpracována v *Jupyter Notebooku*, kde se sledovala zejména stálost nashromážděných dat pro jednotlivé lokalizační jednotky. Velice důležitá zde byla kalibrace a testování vlivu akcelerometru a jednotlivých kompenzací. Pro jednotlivé konfigurace byla data odesílána do lokalizačního frameworku *Find 3*.

### 8.1.1 Vliv velkého prostoru na Wi-Fi

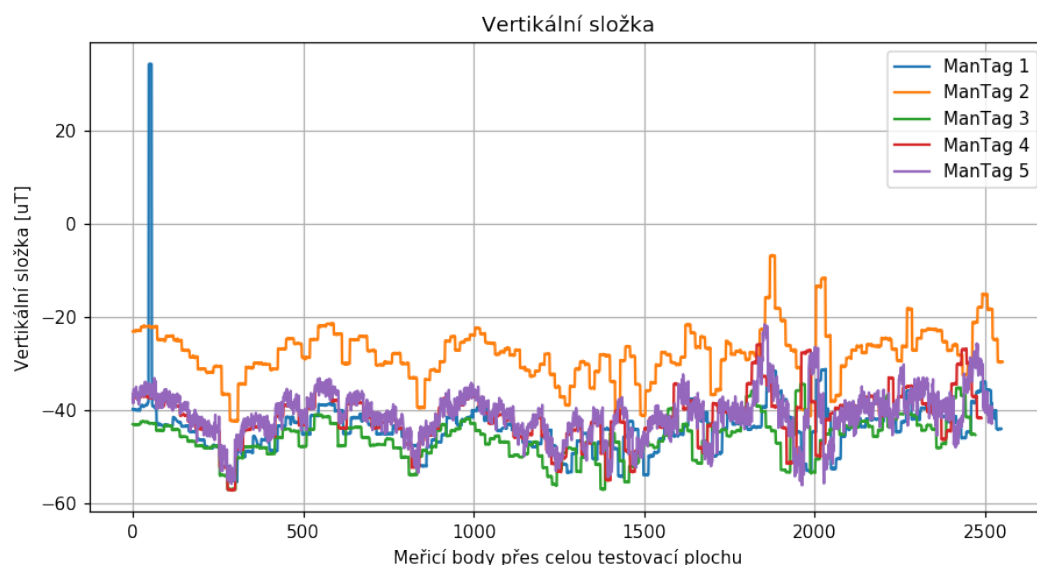
Z dat nasbíraných v předchozí podkapitole je možné vytvořit grafické analýzy pokrytí signálu z jednotlivých přístupových bodů Wi-Fi v závislosti na nasnímaném místě. Předpokládá se, že budou náměry všech pěti použitých lokalizátorů mírně odlišné a to hlavně díky rozdílné poloze antény vůči zdroji. Na výsledcích se totiž projeví dříve zmiňované vícecestné šíření signálu. Pro znázornění proměnlivosti sil signálu RSSI byla naměřená data jednotlivých tagů vynesena do teplotních map. Výsledné teplotní mapy pro konkrétní vysílač jsou součástí přílohy C.3.

### 8.1.2 Vliv velkého prostoru na magnetická měření

V úvodu práce, kde se testovala použitelnost magnetického pole jako lokalizační prvek bylo zjištěno, že se magnetické anomálie mají ve velkém prostoru tendence opakovat. Z dat nashromážděných v kroku popsaném v úvodu této kapitoly byly s pomocí dat z akcelerometru dopočítány všechny možné relevantní magnetické složky zmíněné v kapitole 6.4. Všechny výpočty probíhaly na zkalibrovaných datech magnetometru a akcelerometru. Výsledek všech dopočítaných magnetických složek je zmíněn v příloze C.4, kde jsou data vybrané jednotky (ManTag 1) vynesena do teplotních map. Zobrazené grafy pro absolutní hodnotu vektoru, vertikální a horizontální složku magnetického pole jsou si podobné svou proměnlivostí a tudíž vhodné

jako vstup do učících klasifikátorů systému *Find 3*. Opakovaným měřením byla také zjištěna jejich stálost.

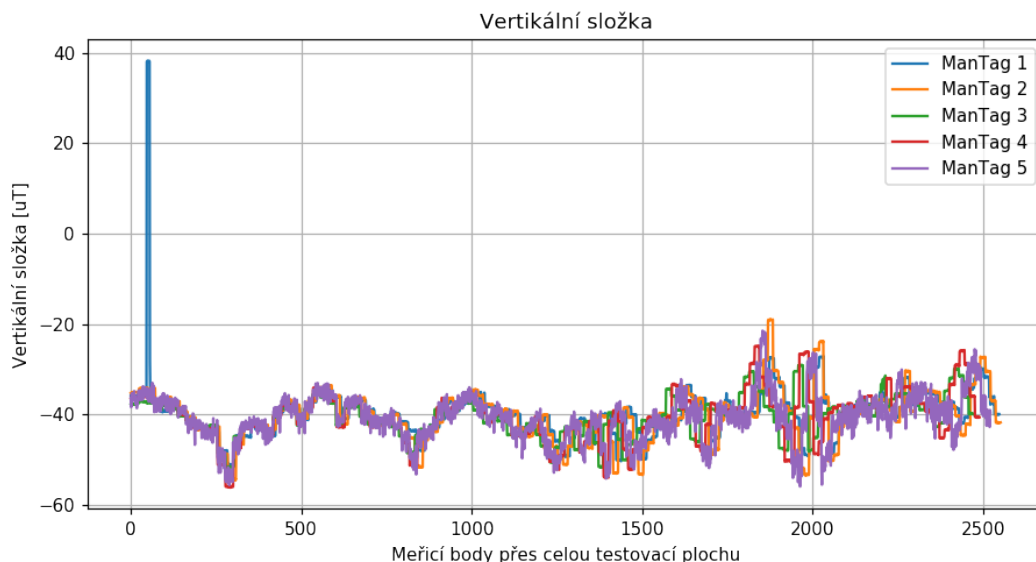
Pokud srovnáme všechny jednotky, které snímaly magnetické pole v průběhu měření, očekáváme, že všechny dopočítané složky magnetického pole budou díky kalibračním procedurám totožné. Zobrazení porovnání vertikálních složek magnetického pole pro jednotlivá lokalizační zařízení v průběhu měření jsou znázorněny na obrázku 8.2. Na vytvořeném grafu jsou však vidět jisté nedokonalosti kalibrace jednotlivých lokalizátorů. Například velké odchýlení naměřených hodnot u zařízení 'ManTag 2', ale především menší odchylky u ostatních zařízení.



Obr. 8.2: Porovnání reálných vertikálních složek magnetického pole měřených zařízení v průběhu měření přes celou testovací plochu

Pro eliminaci kalibrační chyby bylo třeba pozměnit celý kalibrační proces, ve kterém by bylo zapotřebí dokonale rotovat kolem všech os nejlépe konstantní rychlostí. Pro urychlení testování lokalizačního systému byly kalibrační konstanty upraveny ručně, tak aby se jednotlivá měření podobala co nejvíce. Data zkalibrovaná tímto procesem jsou znázorněna na obrázku 8.3.

Pro případ velikosti vektoru intenzity magnetického pole se odchylka jednotlivých zařízení chovala podobně, jako v případě vertikální složky. Horizontální složka se s ohledem na ostatní vynesené charakteristiky odchylovala ve stálosti více. Vhodnost jednotlivých dat pro přesnost konečné lokalizace je diskutována v následující sekci.



Obr. 8.3: Porovnání vertikálních složek pro upravené kalibrační konstanty

## 8.2 Výsledky lokalizace

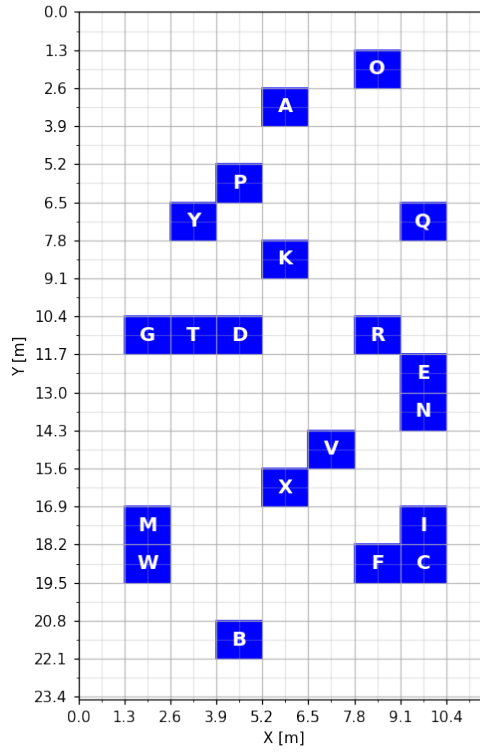
Databáze vytvořená z testovacího měření byla upravena tak, aby obsahovala již zkalibrované a dopočítané hodnoty magnetického pole a hodnoty RSSI, které byly profiltrovány seznamem známých Wi-Fi vysílačů, čímž byla eliminována chyba při snímání dočasných vysílačů. Z takto vytvořených dat bylo experimentálně zjištěno, že pro přesnost učících algoritmů frameworku *Find 3* je vhodné využít pouze absolutní hodnotu vektoru intenzity magnetického pole a jeho vertikální složku. Horizontální složku je nutné eliminovat především pro její nestálost, která je nejspíš způsobena nedokonalým kalibračním procesem.

Pro určení chyby byla testovacím zařízením nasnímána množina testovacích bodů s náhodnými polohami, který je znázorněn na obrázku 8.4.

### 8.2.1 Výsledná chyba učících algoritmů Find 3 frameworku

Přes vizualizační rozhraní *Jupyter Notebook* byla vybraná data importována do lokalizačního frameworku *Find 3*. Po úspěšném importu a dokončení učících procedur jednotlivých klasifikátorů bylo možné skrze vizualizaci spustit algoritmy pro testování přesnosti určení nasnímaných testovacích bodů 8.4.

Díky referenčnímu měření lokalizačním systémem *Pozyx* je možné určit reálnou přesnost jednotlivých klasifikátorů. Systém *Find 3* v online fázi distribuuje soubor pravděpodobností pro jednotlivé klasifikátory. Výsledné pravděpodobnosti jsou svázány s naučenou pozicí. Výsledek lze tedy chápat tak, že je výstupem jednot-



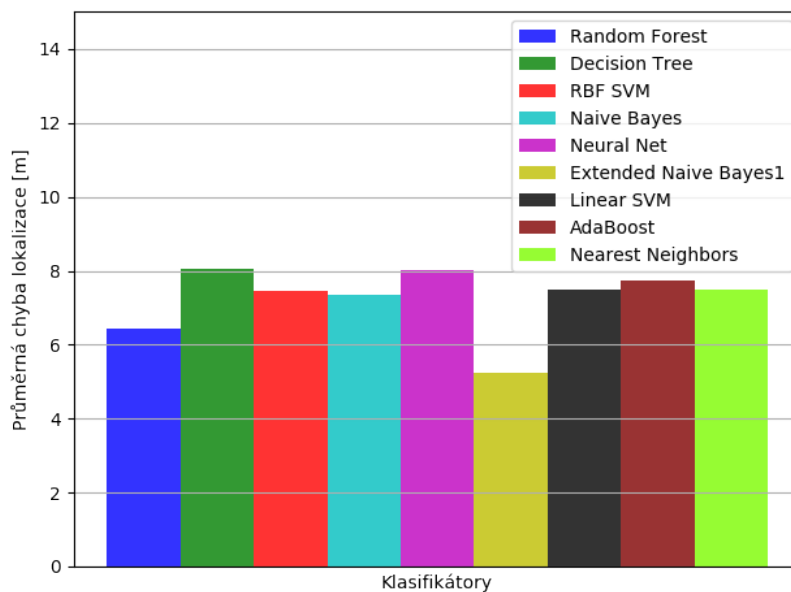
Obr. 8.4: Náhodně nasnímané testovací body v testovacím prostoru pro následné určení chyby výstupu z Find 3

livých klasifikátorů pravděpodobnost polohy pro aktuálně nasnímaná data. Pokud vezmeme v úvahu pouze nejvyšší pravděpodobnosti jednotlivých klasifikátorů napříč všemi testovacími body, dostaneme průměrnou úspěšnost (chybu) určení pozice pro testovací soubor dat, který je zobrazen v obrázku 8.5. Chyba jednotlivých klasifikátorů se pohybuje v rozmezí pěti až osmi metrů. Nejlepší průměrný výsledek byl zaznamenán u 'Extended Naive Bayes' klasifikátoru.

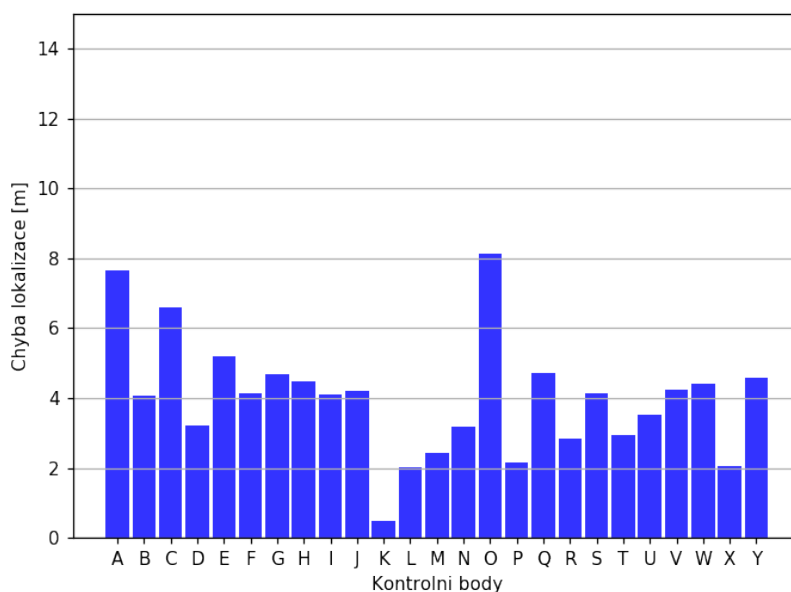
Každý z klasifikátorů má u jednotlivých testovacích bodů rozdílnou úspěšnost. Proto je vhodné pro určení polohy zahrnout veškeré pravděpodobnosti klasifikátorů. Pro zpřesnění výsledků byla použita metoda váženého průměru jednotlivých pravděpodobnostních bodů. Pravděpodobnost každého z bodů je rovna součtu pravděpodobností jednotlivých klasifikátorů. Souřadnice hledané pozice se dopočítají podle vzorce 8.1 a 8.2, kde  $x_n$  a  $y_n$  jsou souřadnice pravděpodobnostních bodů  $p_n$ .

$$x = \frac{\sum_n x_n p_n}{\sum_n p_n} \quad (8.1)$$

$$y = \frac{\sum_n y_n p_n}{\sum_n p_n} \quad (8.2)$$



Obr. 8.5: Průměrná chyba určení pozice jednotlivých klasifikátorů



Obr. 8.6: Chyba lokalizace testovacích bodů z obrázku 8.4 po započtení váženého průměru všech metod

Výsledkem těchto matematických operací je váhování dopočítaných pozic napříč všemi klasifikátory. Výsledek matematických úprav je znázorněn na obrázku 8.6, na kterém je vidět zmenšení lokalizační chyby vzhledem k chybám jednotlivých klasifikátorů (na ose  $x$  jsou znázorněny testovací body z obrázku 8.4). Pro testovací vzorek dat se chyba lokalizace po úpravě průměrně pohybuje okolo 4 metrů.

Analýzou rozmístění pravděpodobnostních bodů bylo zjištěno, že pravděpodobnosti ve větší vzdálenosti ovlivňují navzdory své nízké hodnotě výsledek konečné lokalizace. Pro eliminaci takových bodů je vhodné zjistit alespoň orientační polohu předpokládané polohy. Vypočítat předpokládanou polohu lokalizovaného bodu lze pomocí fyzikální metody šíření signálu volným prostorem, ke které je nutné znát nejen polohu vysílače, ale také jeho parametry. Protože parametry vysílačů nebyly známy, využila se pro výpočet zjednodušená rovnice 8.3, ve které se vzdálenost počítá přes referenční hodnotu útlumu změřenou ve známé vzdálenosti od vysílače. [71]

$$d = 10^{\frac{P_x - P_{iref}}{-10n_i}} \cdot d_{ref} \quad (8.3)$$

Než je možné dopočítat reálnou vzdálenost vysílače od hledaného bodu, je nutné určit pro všechny vysílače exponent útlumu signálu  $n_i$ , který je možné dopočítat díky referenčnímu měření systémem *Pozyx*. Diskutovaný exponent se dopočítá podle vzorce 8.4, kde  $P_i$  udává sílu signálu naměřenou v lokalizovaném bodě,  $P_{iref}$  sílu signálu z blízkosti vysílače,  $d$  hledanou vzdálenost bodu od vysílače a  $d_{ref}$  referenční vzdálenost od vsílače. [71]

$$n_i = \frac{P_i - P_{iref}}{-10 \log_{10}(\frac{d}{d_{ref}})} \quad (8.4)$$

Zkalibrovaný systém vysílačů (hodnoty  $n_i$ ) je následně možné využít pro výpočet vzdálenosti v testovacím měření. Pro určení vzdálenosti stačí pouze upravit vzorec 8.4 do tvaru 8.3.

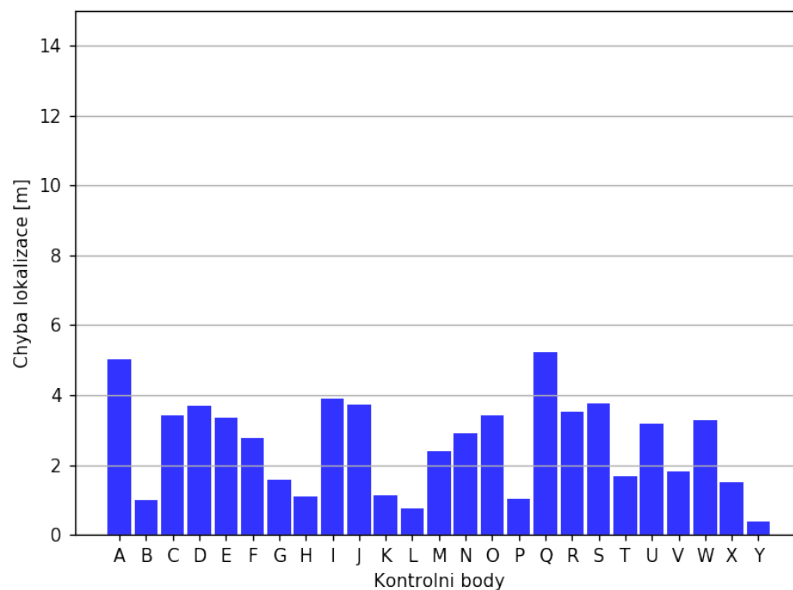
Dopočítané hodnoty jsou vidět v podobě kružnic na obrázku v příloze C.5. Každá z kružnic má poloměr dopočítané vzdálenosti. Na obrázku jsou dále v barevných čtvercích znázorněny jednotlivé pravděpodobnosti. Do šedých barev jsou obarveny body již eliminované trilaterálním algoritmem.

Pro zpracování vzdáleností jednotlivých Wi-Fi vysílačů, projde systém veškeré pravděpodobnostní body a zjistí, zda-li ho neprotíná některá z dopočítaných kružnic, nebo nenachází-li se od ní alespoň 4 metry (experimentálně stanovená hodnota). Pokud bod splňuje tuto podmínku přiřadí mu algoritmus lineárně pravděpodobnost 1 při průniku z kružnicí a 0 pokud je vzdálen od kružnice více jak 4 metry. Pravděpodobnosti pro všechny kružnice se sečtou a následně vyřadí všechny body které se nevyskytují v deseti metrovém okolí bodu s největší pravděpodobností. Dále jsou vyřazeny body, které mají spolu s lokalizační pravděpodobností hodnotu menší než 0.7 (experimentálně stanovená hodnota). Všechny body, které jsou zařazeny do vyhodnocení (příloha C.5) jsou označeny modrou barvou. V každém bodu jsou znázorněny pravděpodobnosti z klasifikátoru (nahore) spolu s pravdepodobností danou trilaterálním filtrem (dole). Z upraveného souboru pozic se následně určí metodou



váženého průměru výsledný bod, kde vstupní pravděpodobností je násobek obou zmiňovaných hodnot. Červenou barvou je poté znázorněna dopočítaná pozice která by v ideálním případě měla náležet zeleně podbarvenému bodu, který značí hledanou polohu.

Na obrázku 8.7 jsou znázorněny výsledné chyby pro množinu testovacích bodů. Průměrná chyba lokalizace byla dopočítána na  $2.6\text{ m}$ , což dokazuje použitelnost právě provedené zpřesnění metody pomocí dopočítávání teoretické vzdálenosti od vysílače. Maximální chyba lokalizace byla v tomto testu  $5,23\text{ m}$ .



Obr. 8.7: Chyba určení pozice po zpřesnění dopočítáváním vzdálenosti vysílače

## 9 METODIKY AKTUALIZACE RÁDIOVÝCH A MAGNETICKÝCH MAP

Jak bylo zdůrazněno v úvodu této práce, Wi-Fi RSSI a hodnota magnetického pole se má tendenci v čase měnit a to v případě přestavby lokalizovaného prostoru, či změnách ve Wi-Fi infrastruktuře. Proto je příhodné vytvořit automatizované způsoby mapování prostoru namísto metod zmíněných v kapitole 8.1.

Prvním způsobem je využít **úklidový stroj**, který pravidelně projíždí výrobní halou pro udržování čistoty na pracovištích. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost vytvořit referenční lokalizační systém. Protože se úklidový stroj pohybuje pouze v jedné rovině, je možné využít jako referenční měření inerciální senzory, které by díky před definovaným průjezdovým bodům (QR kódy) snímaným kamerou, mohly dopočítat referenční polohu v prostoru. Další možné problémy by mohly nastat v softwarové implementaci a uchycení celého přípravku na stroj.

Druhým způsobem je využít **autonomní vozík**, který se samovolně pohybuje mezi určitými stanovišti výrobní haly. Výhodou tohoto přístupu je možnost komunikace, respektive získání referenční polohy z virtuální mapy vozíku. Nevýhodou je omezená pohyblivost a kvůli jeho časové vytíženosti a předprogramovaným trasám také špatná možnost nasnímání celé výrobní haly. Oproti prvnímu zmíněnému způsobu by byla tato metoda jednodušší na implementaci především proto, že by čerpala referenční lokalizační data z rozhraní vozíku.

## 10 ZÁVĚR

V diplomové práci jsou postupně probrány možnosti realizace lokalizačního modulu, který bude mít uplatnění ve výrobních halách pro lokalizování a sledování pohybu výrobků a materiálu v průběhu výroby. Velký důraz je přitom kladen na použitelnost celého systému v již vybudované infrastruktuře respektive cenový dopad výsledné implementace. Hlavním bodem práce je vývoj vlastního lokalizačního zařízení včetně otestování vlastních postupů pro detekci polohy uvnitř budov.

Jako první jsou prozkoumány možné technologie a postupy pro zjišťování polohy uvnitř budov. S ohledem na kritéria diskutovaná v úvodu této práce byla hlavní technologií zvolena technologie Wi-Fi, která v největší možné míře využívá existující infrastruktury podniku a z hlediska dostupné součástkové základny umožňuje nejsnazší implementaci lokalizační jednotky. Metodou pro určení pozice byl zvolen přístup shromažďování sil signálů (fingerprinting).

Pro demonstraci lokalizační metody fungující na principu Wi-Fi fingerprinting, byl koncept otestován na dvou mobilních aplikacích. Systém *Anyplace* vykazoval relativně uspokojivé výsledky. Systém však nebyl uzpůsoben k číselnému vyhodnocení výsledků, či k ověření jeho přesnosti. Navíc bylo zjištěno, že k určení lokace používá postupně zpřesňování pomocí akcelerometru a gyroskopu, což nezapadá do koncepce navrhovaného systému. Druhá aplikace (*Find*) mohla přesně stanovit chybu lokalizace. Velikost signálů byla znázorněna také graficky ve formě map intenzit signálu. V podobném grafu byla také znázorněna procentní úspěšnost správného určení pozice. Z výsledků byla zjištěná také maximální chyba určení přepočítaná na vzdálenost přes 5 m. Na základě naměřených a vypočítaných hodnot jednotlivých systémů v rámci zkušebního provozu bylo rozhodnuto ke specifikaci výsledného systému přidat k měření sil Wi-Fi signálu také měření magnetického pole, které by mělo výsledky lokalizace zpřesnit.

Následně se práce věnovala výběru součástkové základny spolu s návrhem a konstrukcí reálného lokalizačního zařízení. Jako hlavní komunikační jednotka byl zvolen Wi-Fi integrovaný systém *ESP8266* který spolu s IMU obvodem *LSM303* zajišťuje shromažďování a distribuci lokalizačních dat. Zapouzdření bylo realizováno 3D tiskem. Výsledné zařízení bylo oživeno a otestováno především z pohledu doby výdrže na baterii. Jako hlavní regulační zdroj napětí byl na základě testů vybrán DC-DC měnič.

V dalším kroku se práce věnovala problematice magnetického měření. Měřeními byly zjištěny okolní vlivy na magnetická data. Pro eliminaci okolních vlivů byla provedena kalibrace magnetických dat metodou interpolující data na elipsu. Dále bylo zjištěno, že pro lokalizační účely je vhodné magnetická data přizpůsobit akcelerometrem a tím získat reálnou vertikální a horizontální složku vektoru intenzity

magnetického pole, které mohou být spolu s vektorem magnetického pole využity jako vstupní hodnoty pro klasifikační algoritmy.

Dále se práce zabírala převážně návrhem architektury vyvíjeného lokalizačního systému. Byl zmíněn jak návrh programového vybavení lokalizačního zařízení, tak část zmiňující návrh serverové části. Hlavním lokalizačním modulem byl zvolen hotový open source lokalizační framework *Find 3*.

V části zabývající se testováním systému byl popsán a realizován mapovací proces za pomoci vytvořeného mapovacího zařízení. Výstupem mapování jsou teplotní grafy znázorňující proměnlivost sil signálu RSSI spolu s jednotlivými složkami magnetického pole. Následný import dat do lokalizačního frameworku *Find 3*, zjistil lepší výsledek klasifikátorů při eliminaci horizontální magnetické složky. Následně byla zobrazena přesnost lokalizace klasifikátorů vzhledem k referenčnímu systému *Pozyx*. Za pomoci váženého aritmetického průměru bylo docíleno optimálního sjednocení všech klasifikačních pravděpodobností. Průměrná chyba se po tomto kroku pohybovala okolo čtyř metrů. Pro zpřesnění výsledků bylo implementováno dopočítávání přibližné polohy na základě trilaterace signálů Wi-Fi vysílačů, což snížilo průměrnou chybu lokalizace na 2,6 m.

Výsledkem diplomové práce je funkční základ lokalizačního systému na bázi Wi-Fi a snímání anomálií magnetického pole. Systém dosahuje průměrné chyby 2.6 metrů.

Pro jeho další zpřesnění se nabízí zautomatizovat a optimalizovat kalibrační proces magnetometru, který by eliminoval nepřesnosti v horizontální složce magnetického měření, nebo zpřesnit trilaterační filtr. Výsledky lokalizačního systému diskutovány v této práci náleží náhodně vybraným statickým bodům v lokalizačním prostoru. V reálném procesu lokalizace se však bude zařízení pohybovat. Proto bude možné brát ohled na fyzické možnosti pohybu zařízení v prostoru vzhledem k předchozím polohám, například pomocí částicového filtru. Od toho se očekává zpřesnění určení polohy.

Pro účely implementace zařízení do výrobního procesu firmy Alps Electric Czech, s.r.o bude návrh lokalizačního systému dále rozvíjen.

# LITERATURA

- [1] Angle of arrival (AoA) - Wikipedia. [online]. [cit. 12.12.2017].  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Angle\\_of\\_arrival](https://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_arrival)
- [2] AnyPlace | Indoor Information Service. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <https://anyplace.cs.ucy.ac.cy/>
- [3] API - FIND 3 framework. [online]. [cit. 8.4.2018].  
URL <https://www.internalpositioning.com/doc/api.md>
- [4] Artin | Indoor lokalizace a navigace. [online]. [cit. 09.11.2017].  
URL <https://www.artin.cz/cs/reseni/indoor-lokalizace-a-navigace/>
- [5] Asynchronous HTTP Client/Server for asyncio and Python. [online]. [cit. 4.4.2018].  
URL <https://aiohttp.readthedocs.io/en/stable/>
- [6] Bayes' theorem - Wikipedia.  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Bayes%27\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Bayes%27_theorem)
- [7] Bluetooth Beacons and Location Solutions - Kontakt.io. [online]. [cit. 09.11.2017].  
URL <https://kontakt.io/>
- [8] CP2102 single chip USB to Uart bridge - Silicon Labs. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf>
- [9] dBm - Wikipedia. [online]. [cit. 12.12.2017].  
URL <https://en.wikipedia.org/wiki/DBm>
- [10] DC-to-DC converter - Wikipedia. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/DC-to-DC\\_converter](https://en.wikipedia.org/wiki/DC-to-DC_converter)
- [11] Docker - Build, Ship, and Run Any App, Anywher. [online]. [cit. 8.4.2018].  
URL <https://www.docker.com/>
- [12] Ellipsoid or sphere fitting for sensor calibration. [online]. [cit. 3.4.2018].  
URL [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/design\\_tip/group0/a2/98/f5/d4/9c/48/4a/d1/DM00286302/files/DM00286302.pdf/jcr:content/translations/en.DM00286302.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/design_tip/group0/a2/98/f5/d4/9c/48/4a/d1/DM00286302/files/DM00286302.pdf/jcr:content/translations/en.DM00286302.pdf)
- [13] ESP-12 module datasheet. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <https://www.elecrow.com/download/ESP-12F.pdf>

- [14] ESP-WROOM-02 Overview | Espressif Systems. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <http://espressif.com/en/products/hardware/esp-wroom-02/overview>
- [15] ESP8266EX Overview | Espressif Systems. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <http://espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>
- [16] Espressif Systems - Wi-Fi and Bluetooth chipsets and solutions. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <http://espressif.com/>
- [17] Espruino - JavaScript for Microcontrollers. [online]. [cit. 11.3.2018].  
URL <http://www.espruino.com>
- [18] FIND | The framework for inertial navigation and discovery. [online]. [cit. 23.11.2017].  
URL <https://www.internalpositioning.com/>
- [19] GNU Affero General Public License - GNU Project | Free Software Foundation. [online]. [cit. 23.11.2017].  
URL <https://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.en.html>
- [20] The Go Programming Language. [online]. [cit. 8.4.2018].  
URL <https://golang.org/>
- [21] Google Play. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <https://play.google.com/>
- [22] IEEE 802.11 - Wikipedia. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11)
- [23] Indoor Navigation, Indoor Positioning and Indoor Tracking by infsoft. [online]. [cit. 09.11.2017].  
URL <https://www.infsoft.com/>
- [24] Indoor Positioning Systems (IPS) - RTLS Solutions - DecaWave. [online]. [cit. 10.5.2018].  
URL <https://decawave.com>
- [25] The Jupyter Notebook. [online]. [cit. 4.4.2018].  
URL <http://jupyter.org/>
- [26] Lithium polymer battery - sWikipedia. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_polymer\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_polymer_battery)

- [27] LM3670 Miniature Step-Down DC-DC Converter for Ultralow Voltage Circuits datasheet (Rev. F) - lm3670.pdf. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3670.pdf>
- [28] Low Power Consumption LDO = Data Sheet. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <http://www.angeladvance.com/HT73xx.pdf>
- [29] LSM303AGR - Ultra-compact high-performance eCompass module: ultra-low power 3D accelerometer and 3D magnetometer - STMicroelectronics.
- [30] Magnetic PositioningThe Arrival of 'Indoor GPS'. [online]. [cit. 09.11.2017].  
URL [https://www.indooratlas.com/wp-content/uploads/2016/03/magnetic\\_positioning\\_opus\\_jun2014.pdf](https://www.indooratlas.com/wp-content/uploads/2016/03/magnetic_positioning_opus_jun2014.pdf)
- [31] Magnetometer - VectorNav Library. [online]. [cit. 31.3.2018].  
URL <https://www.vectornav.com/support/library/magnetometer>
- [32] Mantag api documentation on Apiary. [online]. [cit. 8.4.2018].  
URL <https://mantag.docs.apiary.io/>
- [33] Markdown - Wikipedie. [online]. [cit. 8.4.2018].  
URL <https://cs.wikipedia.org/wiki/Markdown>
- [34] MicroPython - Python for microcontrollers. [online]. [cit. 11.3.2018].  
URL <http://www.micropython.org>
- [35] MicroPython cross compiler. [online]. [cit. 7.4.2018].  
URL <https://github.com/micropython/micropython/tree/master/mpy-cross>
- [36] MicroPython totorial for ESP8366. [online]. [cit. 11.3.2018].  
URL <https://docs.micropython.org/en/latest/esp8266/esp8266/tutorial/index.html>
- [37] MicroPython WebREPL. [online]. [cit. 15.3.2018].  
URL <https://micropython.org/webrepl/>
- [38] The MIT License | Open Source Initiative. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <https://opensource.org/licenses/MIT>
- [39] Multi-channel power probes | Rohde & Schwarz. [online]. [cit. 19.3.2018].  
URL [https://www.rohde-schwarz.com/us/product/rt-zvcxx-productstartpage\\_63493-357977.html](https://www.rohde-schwarz.com/us/product/rt-zvcxx-productstartpage_63493-357977.html)

- [40] Multilateration (MLAT) - Wikipedia. [online]. [cit. 12.12.2017].  
URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Multilaterations>
- [41] NodeMcu – An open-source firmware based on ESP8266 wifi-soc. [online]. [cit. 11.3.2018].  
URL <http://www.nodemcu.com>
- [42] Pozyx - centimeter positioning for arduino. [online]. [cit. 4.4.2018].  
URL <https://www.pozyx.io/>
- [43] Precise UWB Indoor Positioning Technology | SEWIO. [online]. [cit. 09.11.2017].  
URL <https://www.sewio.net/>
- [44] R&S®RTE1000 oscilloscope | Rohde & Schwarz. [online]. [cit. 19.3.2018].  
URL [https://www.rohde-schwarz.com/us/product/rte-productstartpage\\_63493-54848.html](https://www.rohde-schwarz.com/us/product/rte-productstartpage_63493-54848.html)
- [45] Satellite navigation - Wikipedia. [online]. [cit. 09.11.2017].  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite\\_navigation](https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation)
- [46] Scikit learn - machine learning in Python. [online]. [cit. 8.4.2018].  
URL <http://scikit-learn.org>
- [47] Simple and Effective Magnetometer Calibration. [online]. [cit. 1.4.2018].  
URL <https://github.com/kriswiner/MPU6050/wiki/Simple-and-Effective-Magnetometer-Calibration>
- [48] Simple, Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion / Li-Polymer Charge Management Controller Data Sheet - 22036a.pdf. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001984g.pdf>
- [49] SNR, RSSI, EIRP and Free Space Path Los... - Cisco Support Community. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <https://supportforums.cisco.com/t5/wireless-mobility-documents/snr-rssi-eirp-and-free-space-path-loss/ta-p/3128478>
- [50] SQLite database system. [online]. [cit. 4.4.2018].  
URL <https://www.sqlite.org>
- [51] uCurrent GOLD Multimeter Adapter. [online]. [cit. 19.3.2018].  
URL <https://www.eevblog.com/product/ucurrentgold/>



- [52] Ultra-compact high-performance eCompass module based on the LSM303AGR. [online]. [cit. 18.3.2018].  
URL [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/group0/6d/cd/b8/e0/44/98/4e/81/DM00265383/files/DM00265383.pdf/jcr:content/translations/en.DM00265383.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/6d/cd/b8/e0/44/98/4e/81/DM00265383/files/DM00265383.pdf/jcr:content/translations/en.DM00265383.pdf)
- [53] UNIVERSITY OF CYPRUS. [online]. [cit. 13.11.2017].  
URL <http://ucy.ac.cy/en/>
- [54] Wi-Fi positioning system - Wikipedia. [online]. [cit. 09.11.2017].  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi\\_positioning\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_positioning_system)
- [55] Aitenbichler, E.; Muhlhauser, M.: An IR local positioning system for smart items and devices. In *Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on*, IEEE, 2003, s. 334–339.
- [56] Bai, Y. B.; Gu, T.; Hu, A.: Integrating Wi-Fi and magnetic field for fingerprinting based indoor positioning system. In *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Oct 2016, s. 1–6, doi: 10.1109/IPIN.2016.7743699.
- [57] Breiman, L.: Random forests. *Machine learning*, ročník 45, č. 1, 2001: s. 5–32.
- [58] Chung, W.-Y.; aj.: Enhanced RSSI-based real-time user location tracking system for indoor and outdoor environments. In *Convergence Information Technology, 2007. International Conference on*, IEEE, 2007, s. 1213–1218.
- [59] Faragher, R.; Harle, R.: An analysis of the accuracy of bluetooth low energy for indoor positioning applications. In *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ '14)*, 2014, s. 201–210.
- [60] Gast, M.: *802.11 wireless networks: the definitive guide*. Ö'Reilly Media, Inc.", 2005.
- [61] Gebre-Egziabher, D.; Elkaim, G.; Powell, J. D.; aj.: A non-linear, two-step estimation algorithm for calibrating solid-state strapdown magnetometers. In *8th International St. Petersburg Conference on Navigation Systems (IEEE/AIAA)*, 2001.
- [62] Honkavirta, V.; Perälä, T.; Ali-Löytty, S.; aj.: Location fingerprinting methods in wireless local area networks. *Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, Finland*, 2008.

- [63] Jedari, E.; Wu, Z.; Rashidzadeh, R.; aj.: Wi-Fi based indoor location positioning employing random forest classifier. In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2015 International Conference on*, IEEE, 2015, s. 1–5.
- [64] Keller, J. M.; Gray, M. R.; Givens, J. A.: A fuzzy k-nearest neighbor algorithm. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, , č. 4, 1985: s. 580–585.
- [65] Klepal, M.; Pesch, D.; aj.: Influence of predicted and measured fingerprint on the accuracy of RSSI-based indoor location systems. In *Positioning, Navigation and Communication, 2007. WPNC'07. 4th Workshop on*, IEEE, 2007, s. 145–151.
- [66] Li, B.; Gallagher, T.; Dempster, A. G.; aj.: How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning? In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2012 International Conference on*, IEEE, 2012, s. 1–9.
- [67] Liu, H.; Darabi, H.; Banerjee, P.; aj.: Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, ročník 37, č. 6, 2007: s. 1067–1080.
- [68] Madigan, D.; Einahrawy, E.; Martin, R. P.; aj.: Bayesian indoor positioning systems. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, ročník 2, IEEE, 2005, s. 1217–1227.
- [69] Mautz, R.: *Indoor positioning technologies*. Dizertační práce, 2012.
- [70] Microelectronics, S.: Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass. <http://www.st.com/stonline/products/literature/an/17>, ročník 3, č. 5, 2010: str. 3.
- [71] OnkarPathak, P. P.; Palkar, R.; Tawari, M.: Wi-Fi Indoor Positioning System Based on RSSI Measurements from Wi-Fi Access Points–A Tri-lateration Approach.
- [72] Subhan, F.; Hasbullah, H.; Rozyyev, A.; aj.: Indoor Positioning in Bluetooth Networks Using Fingerprinting and Lateration Approach. 04 2011.
- [73] Subhan, F.; Hasbullah, H.; Rozyyev, A.; aj.: Indoor positioning in bluetooth networks using fingerprinting and lateration approach. In *Information Science and Applications (ICISA), 2011 International Conference on*, IEEE, 2011, s. 1–9.

- [74] Thurmond, V. A.: The point of triangulation. *Journal of nursing scholarship*, ročník 33, č. 3, 2001: s. 253–258.
- [75] Torteeka, P.; Chundi, X.: Indoor positioning based on Wi-Fi fingerprint technique using fuzzy K-nearest neighbor. In *Applied Sciences and Technology (IB-CAST), 2014 11th International Bhurban Conference on*, IEEE, 2014, s. 461–465.
- [76] Varshavsky, A.; De Lara, E.; Hightower, J.; aj.: GSM indoor localization. *Pervasive and Mobile Computing*, ročník 3, č. 6, 2007: s. 698–720.
- [77] Woodman, O. J.: An introduction to inertial navigation. Technická zpráva, University of Cambridge, Computer Laboratory, 2007.
- [78] Yamaguchi, S.; Mai, V. V.; Thang, T. C.; aj.: Design and performance evaluation of VLC indoor positioning system using optical orthogonal codes. In *Communications and Electronics (ICCE), 2014 IEEE Fifth International Conference on*, IEEE, 2014, s. 54–59.
- [79] Zeinalipour-Yazti, D.; Laoudias, C.; Georgiou, K.; aj.: Internet-based indoor navigation services. *IEEE Internet Computing*, ročník 21, č. 4, 2017: s. 54–63.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

IPS	Indoor Positioning System
GPS	Global Positioning System
GLONAS	Globalnaja Navigacionnaja sputnikovaja Sistěma
IMU	Inertial Measurement Unit
QR	Quick Response
BLE	Bluetooth Low Energy
WLAN	Wireless Local Area Network
WPS	Wi-Fi Positioning System
RFID	Radio Frequency Identification
UWB	Ultra-Wideband
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
GSM	Global System for Mobile Communications
VLC	Visible Light Communication
LED	Light-Emitting Diode
IR	Infrared
FCS	Frame Check Sequence
RSSI	Received Signal Strength Indicator
Li-Po	Lithium-polymer
MIT	Massachusetts Institute of Technology
K-NN	K-Nearest Neighbor
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus
AoA	Angle of Arrival
ToF	Time of Flight
TDoA	Time Difference of Arrival
GNSS	Global Navigation Satellite System
LoS	Line of Sight
NLoS	Non Line-of-Sight
HASL	Hot Air Solder Leveling
SDK	Software development kit
RAM	Random-Access memory
REPL	Read Evaluate Print Loop
FIFO	First In, First Out
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
API	Application Programming Interface

Ah	Ampér hodina
m	Metr
V	Volt
B	Bajt
b	Bit
G	Gauss
T	Tesla
Hz	Herz

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Zpracování dat systému Find</b>	<b>91</b>
A.1	Šachovnicová měřicí plocha . . . . .	91
A.2	Velikost úrovně signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů . . . . .	92
A.3	Velikost rozptylu signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů . . . . .	93
A.4	Velikost směrodatné odchylky signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů . . . . .	94
A.5	Procentní úspěšnost určení jednotlivých bodů v síti . . . . .	95
<b>B</b>	<b>Návrh lokalizačního zařízení</b>	<b>96</b>
B.1	Schematický návrh . . . . .	96
B.2	Oživení lokalizačního zařízení . . . . .	97
<b>C</b>	<b>Testování lokalizačního systému</b>	<b>98</b>
C.1	Testovací proces mapování prostoru . . . . .	98
C.2	Mapovací zařízení . . . . .	99
C.3	Otisk síly signálu konkrétního Wi-Fi vysílače pro zmapovaný prostor . . . . .	99
C.4	Proměnlivost složek magnetického pole v testovacím prostoru . . . . .	101
C.5	Testovací lokalizace . . . . .	103
<b>D</b>	<b>Nákupní seznam</b>	<b>104</b>
<b>E</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>105</b>

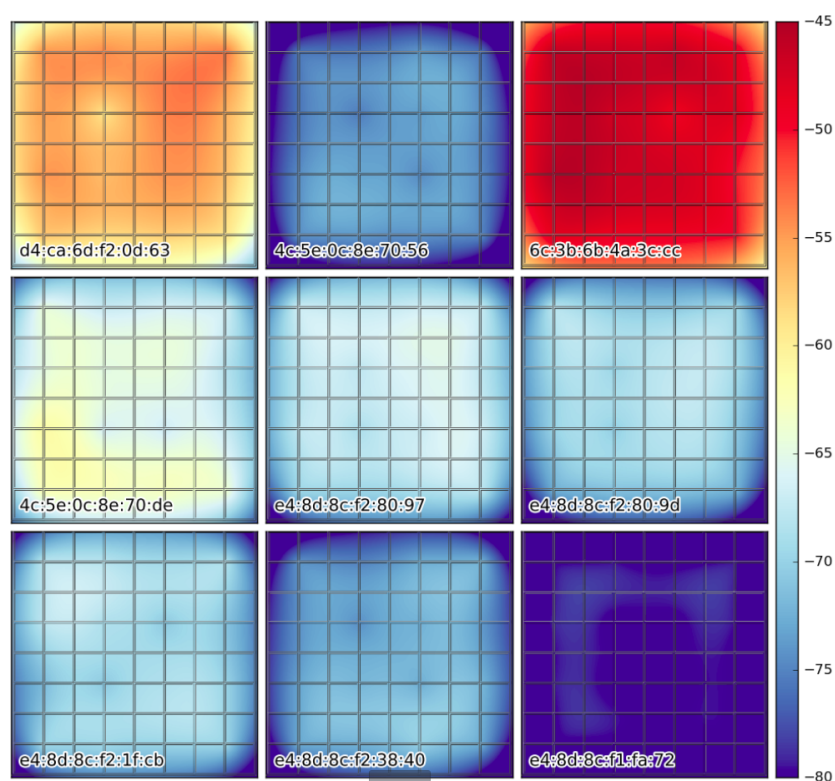
## A ZPRACOVÁNÍ DAT SYSTÉMU FIND

### A.1 Šachovnicová měřicí plocha



Obr. A.1: Měřicí plocha ve firmě Alps Electric pro testy v kapitole 3.2 a sekci 6.5

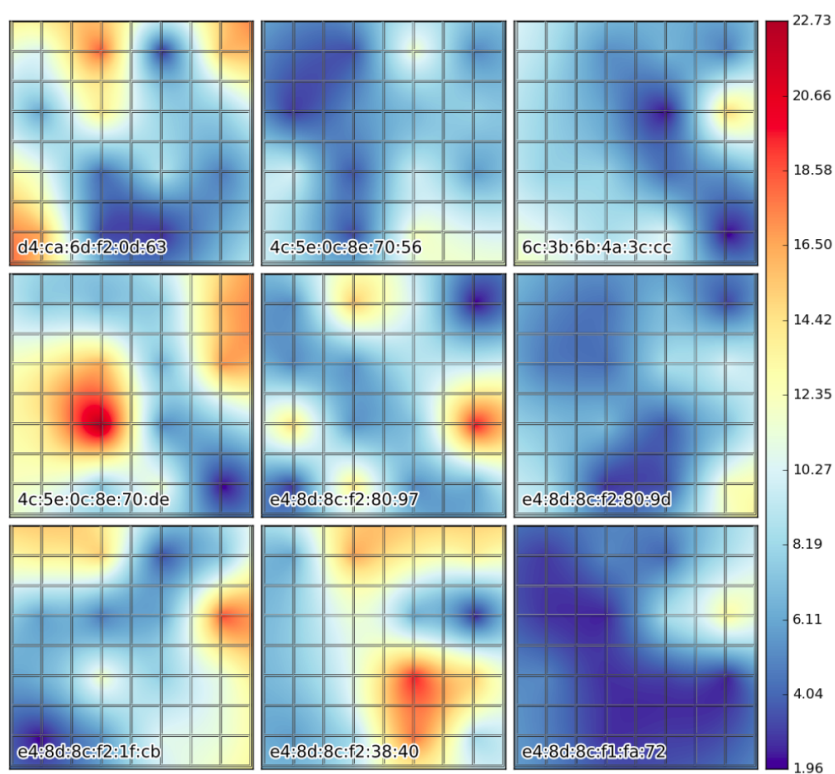
## A.2 Velikost úrovní signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů



Obr. A.2: Velikost úrovní signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů pro testovací plochu A.1, kde jednotlivé čtverce odpovídají čtvercům sítě jednotlivých teplotních map - Find

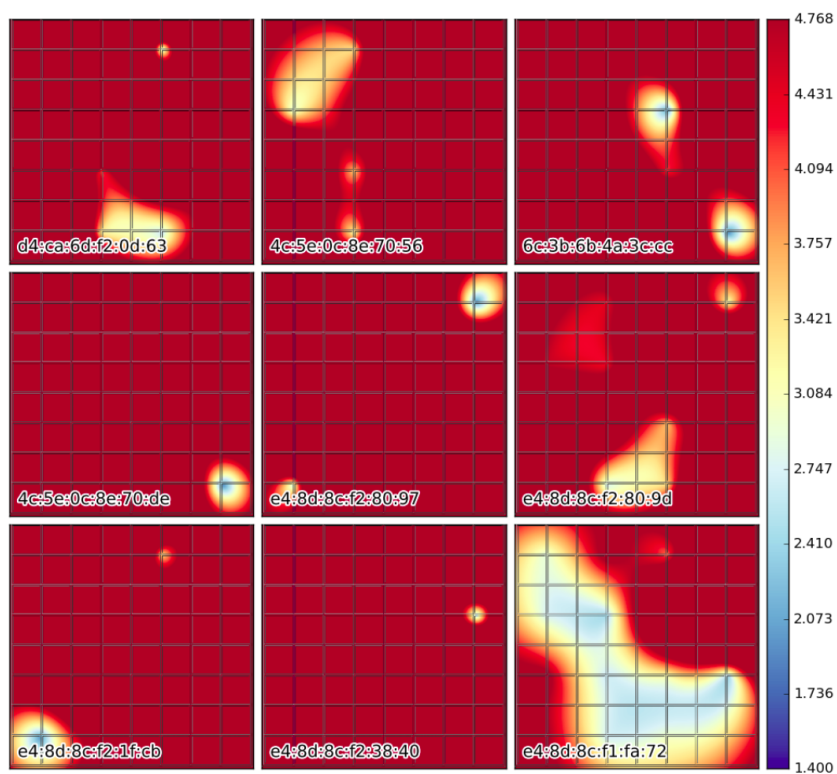


### A.3 Velikost rozptylu signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů



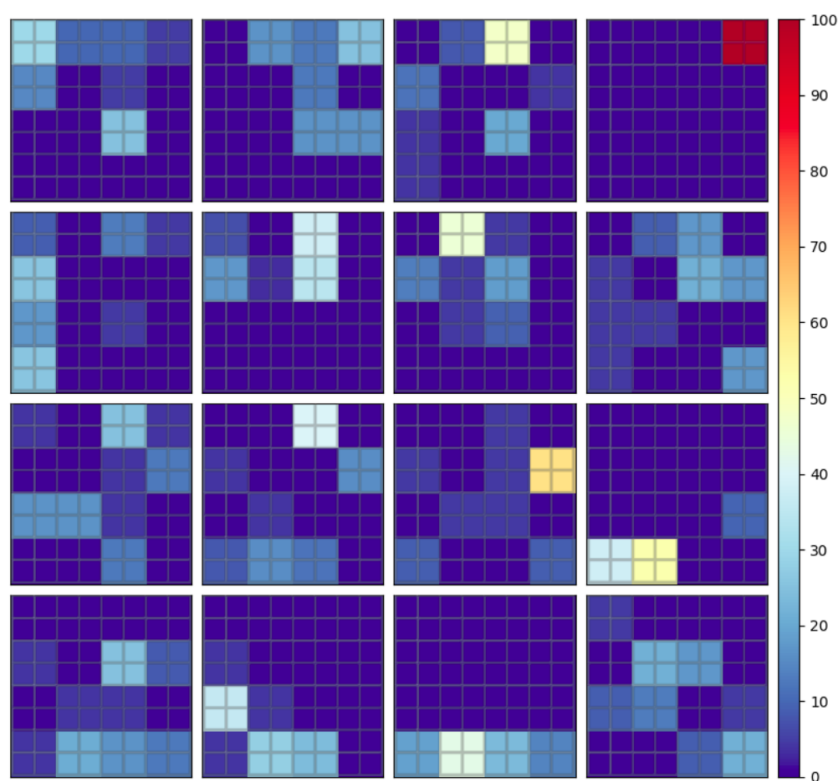
Obr. A.3: Velikost rozptylu signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů pro testovací plochu A.1, kde jednotlivé čtverce odpovídají čtvercům sítě jednotlivých teplotních map - Find

## A.4 Velikost směrodatné odchylky signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů



Obr. A.4: Velikost směrodatné odchylky signálu jednotlivých Wi-Fi vysílačů pro testovací plochu A.1, kde jednotlivé čtverce odpovídají čtvercům sítě jednotlivých teplotních map - Find

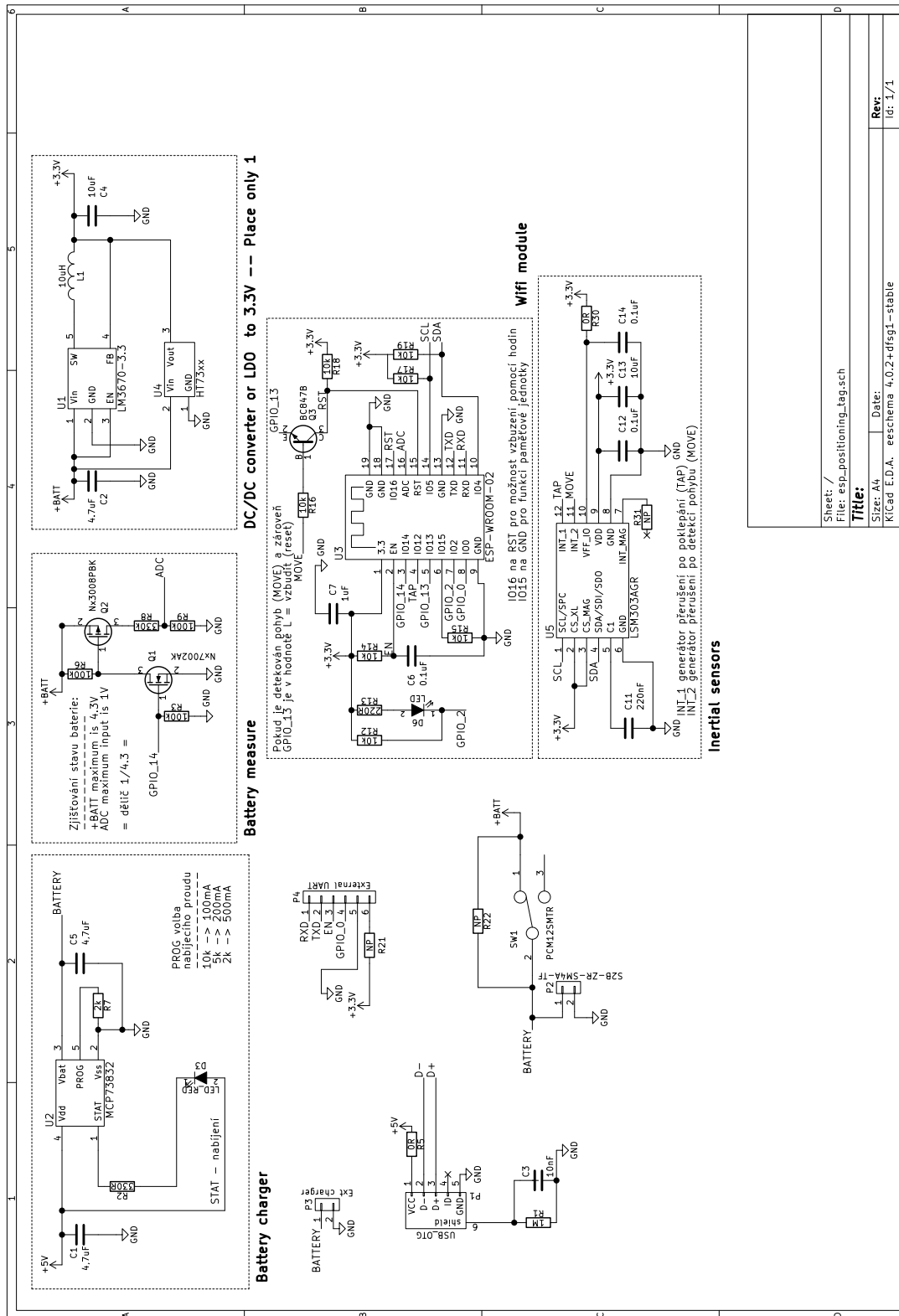
## A.5 Procentní úspěšnost určení jednotlivých bodů v síti



Obr. A.5: Procentní úspěšnost jednotlivých hledaných bodů pro testovací plochu A.1, kde jednotlivé čtverce odpovídají čtvercům sítě jednotlivých teplotních map - Find

# B NÁVRH LOKALIZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

## B.1 Schematický návrh



## B.2 Oživení lokalizačního zařízení

Výpis B.1: Ukázka MicroPython programu pro zjištění stavu baterie

```
1 from machine import Pin, ADC, deepsleep
2 import time
3 # nastavení ADC
4 adc = ADC(0)
5 # nastavení GPIO14 a GPIO2 jako výstupní
6 bat = Pin(14, Pin.OUT)
7 led = Pin(2, Pin.OUT)
8 def getBattery():
9     # aktivace delice
10    bat.value(True)
11    # získání hodnoty na delici
12    adc_value = adc.read()
13    # deaktivace delice kvůli úspore
14    bat.value(False)
15    return adc_value
16 # blikání s LED dokud nebude stav baterie 0% => 780
17 while 1:
18     if getBattery() <= 780:
19         deepsleep()
20     else:
21         led.value(not led.value())
22         time.sleep(1)
```

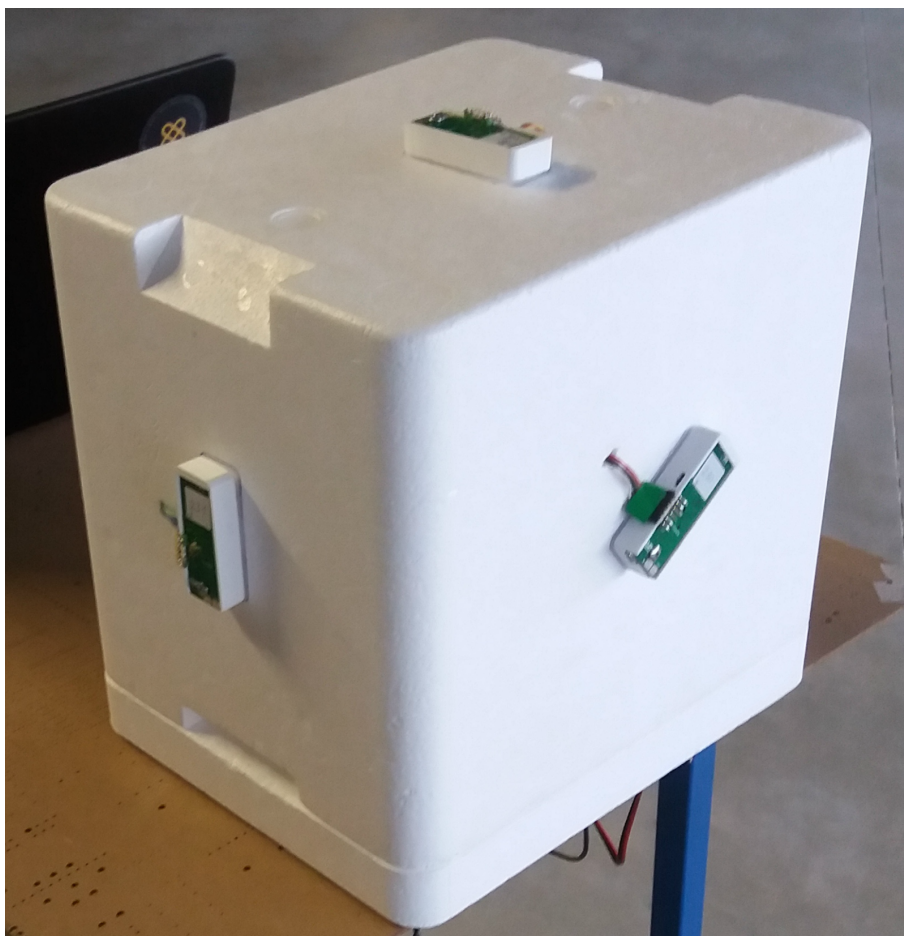
## C TESTOVÁNÍ LOKALIZAČNÍHO SYSTÉMU

### C.1 Testovací proces mapování prostoru



Obr. C.1: Mapování prostoru

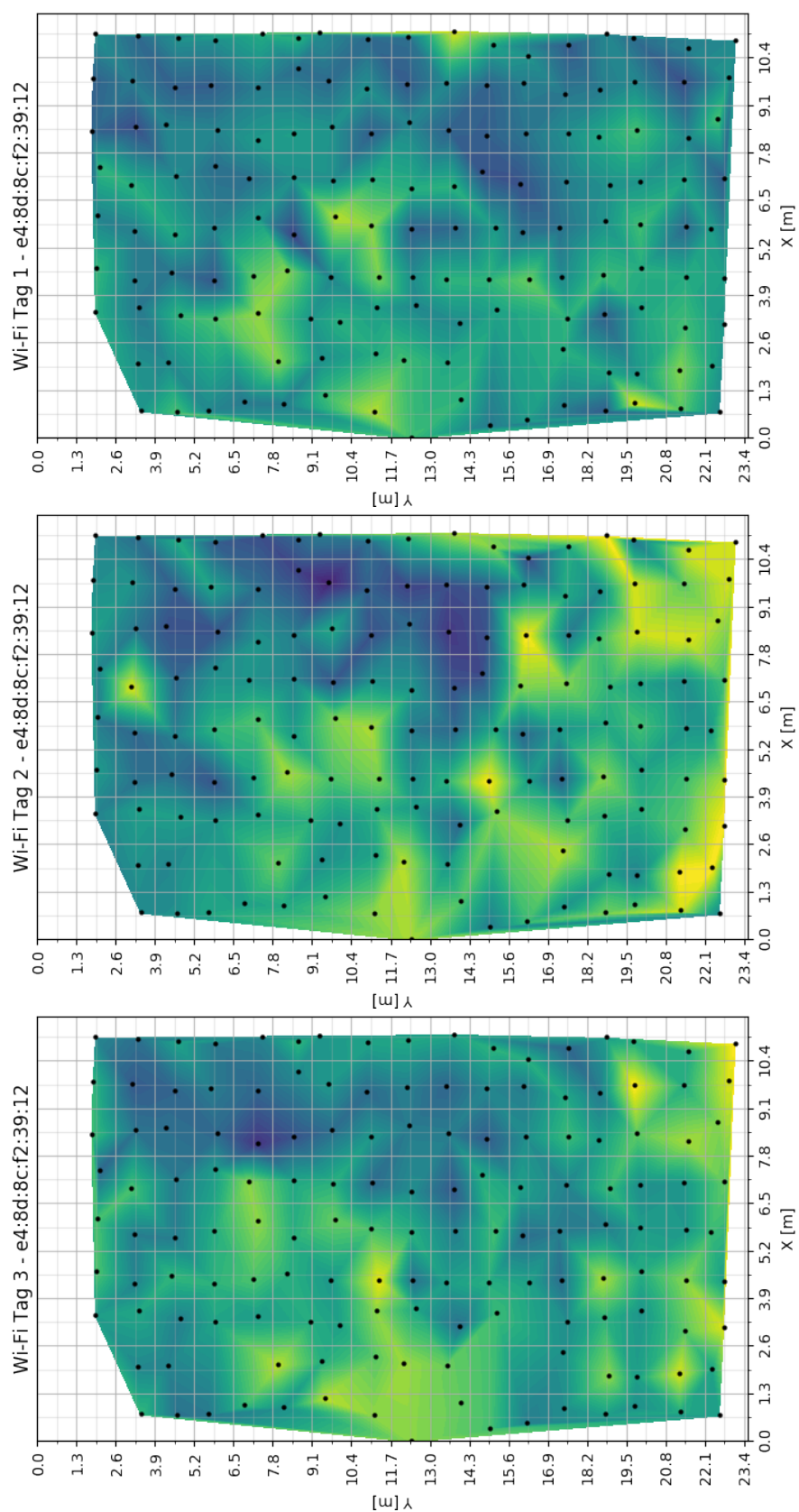
## C.2 Mapovací zařízení



Obr. C.2: Mapovací zařízení

## C.3 Otisk síly signálu konkrétního Wi-Fi vysílače pro zmapovaný prostor

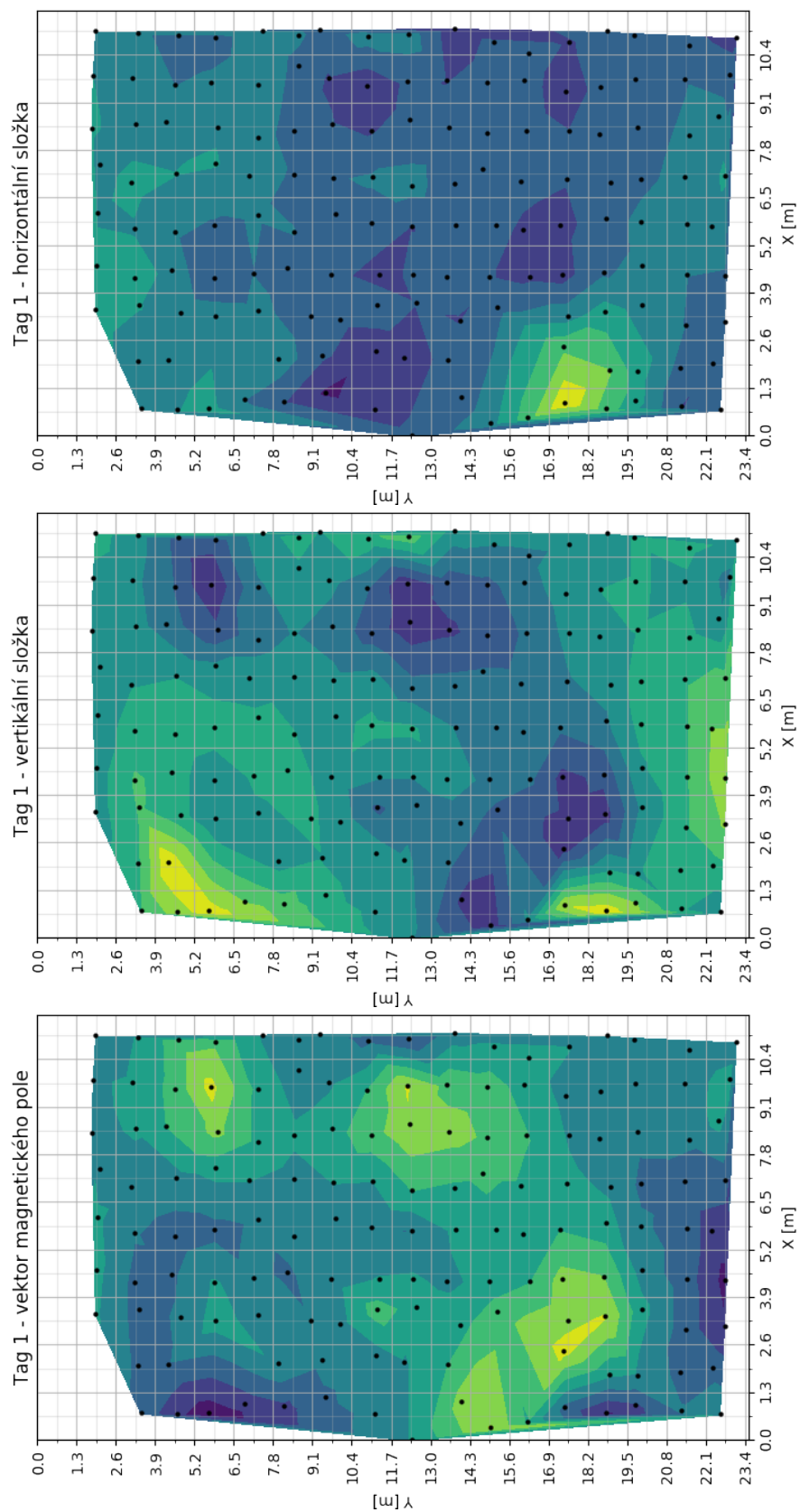




Obr. C.3: Síla signálu Wi-Fi e4:8d:8c:f2:39:12 v testovacím prostoru 11,6 x 23,5 m pro lokalizátory 1, 2 a 3

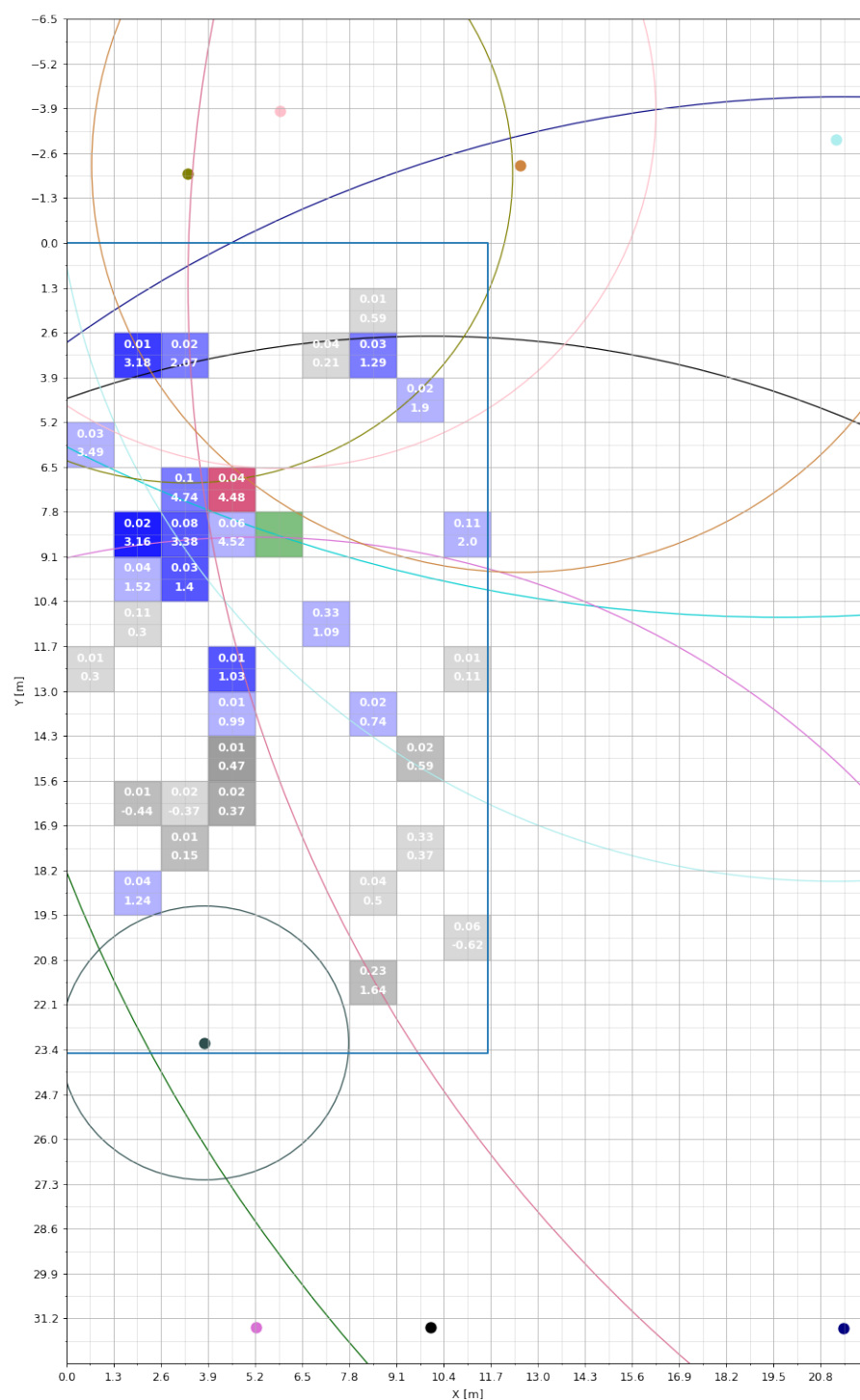


## C.4 Proměnlivost složek magnetického pole v testovacím prostoru



Obr. C.4: Proměnlivost magnetických složek pro vybraný lokalizátor

## C.5 Testovací lokalizace



Obr. C.5: Výsledná lokalizace s triangulovaným zpřesněním

## D NÁKUPNÍ SEZNAM

Tab. D.1: Nákupní seznam lokalizačního zařízení (ceny při objednání 50 kusů)

Hodnota	Prodejce	Objed. Kód	Kus [Kč]	Kusů	Cena [Kč]
MC34447	Farnel	1578201	3,49	1	3,49
USB_OTG	Farnel	2293752	14,27	1	14,27
10nF	Farnel	8819734	0,36	1	0,36
0,1uF	Farnel	2496809	0,18	3	0,54
220nF	Farnel	2524739	0,59	1	0,59
4,7uF/10V	Farnel	2112745	0,93	3	2,80
10uF/10V	Farnel	2611919	3,99	2	7,98
0R	Farnel	1174140	0,08	2	0,16
220R	Farnel	2078857	0,22	1	0,22
330R	Farnel	2078858	0,22	1	0,22
2k	Farnel	2072752	0,19	1	0,19
10k	Farnel	2072528	0,08	8	0,66
100k	Farnel	2447094	0,07	3	0,22
330k	Farnel	2447158	0,08	1	0,08
1M	Farnel	2447127	0,07	1	0,07
3216SURCK	Farnel	2217903	3,06	1	3,06
3216SGC	Farnel	2217901	3,16	1	3,16
10uH	Farnel	2616861	6,76	1	6,76
Nx3008PBK	Farnel	2069547	1,18	1	1,18
Nx7002AK	Farnel	2191746	2,38	1	2,38
BC847B	Farnel	1653607	2,59	1	2,59
PCM12SMTR	Farnel	9575146	15,84	1	15,84
LM3670-3,3	Farnel	1685757	19,67	1	19,67
LSM303AGR	Farnel	2664523	44,9	1	44,90
MCP73832	Farnel	1834892	9,96	1	9,96
ESP-WROOM-02	TME		64,86	1	64,86
HT7333	Ebay		1,50	1	1,50
3,7V 300mAh Li-po	Ebay		45,00	1	45,00
DPS	EasyEda		8,61	1	8,61
Celková cena zařízení s využitím DC-DC zdroje					260 Kč
Celková cena zařízení s využitím LDO zdroje					235 Kč

## E OBSAH PŘÍLOŽENÉHO CD

/	kořenový adresář příloženého CD
└─ firmware	firmware lokalizačního zařízení
└─ boot.py	startovací soubor
└─ config	konfigurační soubor
└─ configure.py	generátor konfiguračních souborů
└─ esp8266-20171101-v1.9.3.bin	použitá verze MicroPythonu
└─ lsm303.py	třídy pro správu IMU
└─ main.py	hlavní spouštěcí soubor
└─ minify	skript pro minimalizaci firmwaru
└─ putall	skript pro automatický upload do ESP
└─ tag.py	třída pro správu zařízení
└─ testing.py	třída pro testování zařízení
└─ hw	hardwarový návrh lokalizačního tagu
└─ case	návrh zapouzdření programem FreeCad
└─ mantag_case.fcstd	
└─ esp_positioning_tag.pro	KiCad projekt návrhu zařízení
└─ jupyter_test_results	testovací programy Jupyter Notebook
└─ battery_test.ipynb	testy DC-DC a LDO
└─ calibration_funcions.ipynb	soubor kalibračních funkcí
└─ cube_accel.ipynb	testy mapování - akcelerometr
└─ cube_graphic_checker.ipynb	grafické testy výsledků systému
└─ cube_operations.ipynb	kalibrace a implementace dat do Find 3
└─ find_parser.ipynb	testování Find 3
└─ find_parser2.ipynb	testování Find 3
└─ magneticka_sit.ipynb	testování magnetometru
└─ magneticka_sit2.ipynb	testování magnetometru
└─ magnetometer_calibration.ipynb	testování kalibrace
└─ magnetometer_calibration_methods.ipynb	testování kalibrace
└─ magnetometer_calibration2.ipynb	testování kalibrace
└─ magnetometer_dc_ldo.ipynb	testování vlivu zdroje na magnetometr
└─ magnetometer_disortions.ipynb	testování chyb magnetometru
└─ magnetometer_measure_rotate.ipynb	testování vlivu rotace na magnetometr
└─ magnetometer_measure_uart_impact.ipynb	testování vlivu UART na magnetometr
└─ magnetometer_2d_vector.ipynb	testování magnetometru
└─ vyhodnoceni_tehnologii.ipynb	tvorba grafů
└─ wifi-analyze.ipynb	tvorba grafů
└─ mapping_cube	obslužný program pro testovací mapování
└─ run.py	program pro mapování mapovacím zařízením
└─ run_calibration.py	kalibrační proces mapovacího zařízení
└─ run_online.py	on-line Find 3 testování
└─ pozyx	obslužný program pro systém Pozyx
└─ lab_demo	
└─ run.py	testovací funkce systému Pozyx

└─ mag_demo.py.....	testování sběru dat magnetometru
server_side.....	programy pro serverovou část systému
└─ main.py.....	startovací funkce serveru + API
└─ mantag.db.....	databázová struktura
└─ models.py.....	trídy a funkce pro práci s databází
testing_db.....	složka testovací databáze
text.....	zdrojové soubory textové části práce, prezentace a EEICT v LaTeX
vyhodnoceni_grid.....	vyhodnocovací programy pro testy Find mobilní aplikace
wifi-heatmap.....	programy pro grafické znázornění testů na mobilních aplikacích